

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivo Mišur**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc.dr. sc. Gojko Marić, dipl. ing.

Student:

Ivo Mišur

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Koristim ovu priliku da se zahvalim na stručnoj pomoći svome mentoru doc.dr.sc. Gojku Mariću.

Također, zahvaljujem se laborantu Božidaru Bušetinčanu i asistentu Hrvoju Rafaelu na pomoći prilikom izrade rada.

Na kraju se zahvaljujem svojoj obitelji, majci Nadi, ocu Željenu i bratu Marinu na strpljenju i potpori tijekom studiranja.

Ivo Mišur

Zadatak diplomskog rada umjesto ove stranice

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	X
1. UVOD.....	1
2. PROIZVODNJA METALNIH PJENA .....	2
2.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini .....	2
3. SVOJSTVA METALNIH PJENA .....	4
3.1. Mehanička svojstva metalnih pjena .....	4
3.1.1. Krutost .....	6
3.1.2. Tlačna čvrstoća .....	7
3.1.3. Vlačna čvrstoća .....	9
3.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju- umor .....	10
3.1.5. Osjetljivost na ureze .....	12
3.1.6. Ponašanje pri puzanju .....	14
3.2. Ostala svojstva metalnih pjena.....	15
3.2.1. Zvučna svojstva .....	15
3.2.2. Prigušenje vibracija .....	16
3.2.3. Električna svojstva .....	17
4. PRIMJENA METALNIH PJENA.....	19
5. TOPLINSKA SVOJSTVA METALNIH PJENA .....	21
5.1. Koeficijent toplinske dilatacije .....	22
5.2. Prijenos topline .....	25
5.3. Vatrootpornost .....	27
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	30
6.1. Dilatometar.....	31
6.2. Izrada kalupa .....	33
6.3. Priprema kalupa .....	35
6.4. Izrada uzoraka aluminijskih pjena .....	38
6.5. Izrada uzoraka aluminijske žice .....	44
6.6. Ispitivanje uzoraka na dilatometru .....	47
7. REZULTATI ISPITIVANJA DILATOMETRA .....	49
7.1. Dilatogrami .....	49
7.2. Koeficijent toplinske dilatacije .....	71
8. ISPITIVANJE TVRDOĆE.....	72

9. ZAKLJUČAK .....	75
LITERATURA.....	76

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Proces nastajanja FOAMINAL-ALULIGHT metalne pjene .....	3
Slika 3.1. a) Zatvorene ćelije metalne pjene .....	6
Slika 3.1. b) Otvorene ćelije metalne pjene .....	6
Slika 3.2. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjena.....	6
Slika 3.3. Dijagram naprezanje-deformacija metalnih pjena pri tlačnom opterećenju .....	7
Slika 3.4. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći.....	8
Slika 3.5. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granice tečenja materijala ćelija ( $R_e$ ) o relativnoj gustoći.....	8
Slika 3.6. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku kosti .....	9
Slika 3.7. Dijagram naprezanje-istezanje Al pjena.....	9
Slika 3.8. Uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće od CYMAT metalne pjene .....	10
Slika 3.9. Vrste dinamičkih opterećenja .....	11
Slika 3.10. Način 1. Skraćenje Duocel Al—6101-T6 pjene u uvjetima umora izazvanog tlačnim opterećenjima .....	11
Slika 3.11. Način 2. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja .....	12
Slika 3.12. Način 3. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja.....	12
Slika 3.13. Čvrstoća kod postojanja provrta u uvjetima tlačnog i vlačnog opterećenja.....	13
Slika 3.14. Ureznja čvrstoća u uvjetima tlačnog promjenjivog opterećenja ( $R = 0,1$ ) uz praktički beskonačan broj ciklusa na pjenama s provrtom.....	13
Slika 3.15. Krivulje puzanja ALPORAS pjene u uvjetima vlačnog i tlačnog opterećenja .....	15
Slika 3.16. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al .....	16
Slika 3.17. a) Vibrirajuća masa s jednim stupnjem slobode; b) funkcija prigušenja .....	17
Slika 3.18. Mjerenje električnih svojstava metalnih pjena kontaktom u četiri točke .....	18
Slika 4.1. Primjena metalnih pjena u autoindustriji.....	20
Slika 4.2. Izmjenjivač topline .....	20
Slika 5.1. Način mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti.....	25
Slika 6.1. Dijelovi dilatometra.....	31
Slika 6.2. Dilatometar u radu.....	32
Slika 6.3. Kalup .....	34
Slika 6.4. Gornji dio kalupa.....	34
Slika 6.5. Bušenje rupe u kalupu koja omogućuje izlazak pjene u kalupu.....	35
Slika 6.6. Probušena rupa u kalupu za izlazak pjene .....	36
Slika 6.7. Čišćenje kalupa u benzinu .....	36
Slika 6.8. Propuhivanje kalupa zrakom iz kompresora .....	37
Slika 6.9. Nanošenje keramike na unutrašnju površinu kalupa.....	37
Slika 6.10. Keramika na kalupu .....	38
Slika 6.11. Prekursor .....	39
Slika 6.12. Usitnjavanje prekursora sa škarama .....	40
Slika 6.13. Prekursor na vagi.....	41
Slika 6.14. Postavljanje dijelova prekursora u kalup.....	41
Slika 6.15. Elektrootporna peć .....	42
Slika 6.16. Ohlađeni kalup i kapljica pjene na površini kalupa prema kojoj se zna da je pjena gotova .....	43
Slika 6.17. Kalup u peći.....	43
Slika 6.18. Užareni kalup nakon vađenja iz peći.....	44

Slika 6.19. Brušenje ruba aluminijske žice.....	45
Slika 6.20. Ispitni uzorci.....	45
Slika 6.21. Primjer oznake uzorka .....	46
Slika 6.22. Postavljanje uzorka u dilatometar .....	47
Slika 6.23. Uzorak u dilatometru.....	48
Slika 7.1. Dilatogram žarenja AlSi5 žice-300 na 450 °C .....	49
Slika 7.2. Dilatogram žarenja AlSi5 žice-300 na 450 °C .....	50
Slika 7.3. Dilatogram žarenja AlSi5 žice-300 na 450 °C .....	50
Slika 7.4. Dilatogram AlSi5 žica-450 uzorka tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	51
Slika 7.5. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.1 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	52
Slika 7.6. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.2 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	52
Slika 7.7. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.3 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	53
Slika 7.8. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.4 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	53
Slika 7.9. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.5 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	54
Slika 7.10. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.6 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	54
Slika 7.11. Dilatogram srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-450 od br.1. do br.6. tijekom zagrijavanja na temperaturu 450 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	55
Slika 7.12. Usporedba dilatometra Al Si 5 žica-450 i srednjih vrijednosti Al Si 10 pjena-450 od br.1 do br.6. ....	56
Slika 7.13. Dilatogram uzorka AlSi5 žica-300 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	57
Slika 7.14. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.1 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	58
Slika 7.15. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.2 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	58
Slika 7.16. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.3 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	59
Slika 7.17. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.4 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	59
Slika 7.18. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.5 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	60
Slika 7.19. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.6 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	60
Slika 7.20. Dilatogram srednje vrijednosti AlSi10 pjena-300 od br.1 do br.6. tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	61
Slika 7.21. Usporedba dilatometra Al Si 5 žica-300 i srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-300 od br.1 do br.6. ....	62
Slika 7.22. Dilatogram AlSi5 žica-140 uzorka tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	63



Slika 7.23. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.1 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	64
Slika 7.24. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.2 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	64
Slika 7.25. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.3 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	65
Slika 7.26. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.4 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	65
Slika 7.27. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.5 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	66
Slika 7.28. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.6 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	66
Slika 7.29. Dilatogram prosjeka AlSi10 pjena-140 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	67
Slika 7.30. Dilatogram AlSi5 žica-140 i srednje vrijednosti AlSi10 pjena-140 od br.1 do br.6. tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja .....	68
Slika 8.1. Zaliveni uzorci za ispitivanje tvrdoće .....	72
Slika 8.2. Tvrdomjer .....	73
Slika 8.3. Referentni etalon tvrdoće .....	73

**POPIS TABLICA**

Tablica 3.1. Izrazi za računanje svojstava metalnih pjena .....	5
Tablica 3.2. Mehanička svojstva metalnih pjena .....	5
Tablica 3.3. Električna otpornost metalnih pjena.....	18
Tablica 4.1. Moguća primjena metalnih pjena .....	19
Tablica 5.1 Toplinska svojstva metalnih pjena .....	21
Tablica 6.1 Oznake i duljine izrađenih uzoraka .....	46
Tablica 7.1 Konačne dilatacije aluminijskih žica nakon žarenja .....	69
Tablica 7.2 Konačne dilatacije uzoraka zagrijavanih na 450 Celzija.....	69
Tablica 7.3 Konačne dilatacije uzoraka zagrijavanih na 300 Celzija.....	69
Tablica 7.4 Konačne dilatacije uzoraka zagrijavanih na 140 Celzija.....	70
Tablica 7.5 Koeficijenti dilatacije svih uzoraka .....	71
Tablica 8.1 Rezultati mjerenja tvrdoće .....	74

## POPIS OZNAKA

### OZNAKA, OPIS, JEDINICA

$A$ ,	površina, $\text{mm}^2$
$a^*$ ,	negativno ubrzanje, $\text{m/s}^2$
$C$ ,	konstanta
$C_p$ ,	specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku, $\text{J/kgK}$
$C_v$ ,	specifični toplinski kapacitet pri stalnom volumenu, $\text{J/kgK}$
$E$ ,	modul elastičnosti, $\text{GPa}$
$E_f$ ,	modul savitljivosti, $\text{GPa}$
$F$ ,	sila, $\text{N}$
$F_{\max}$ ,	maksimalna sila elastične deformacije, $\text{N}$
$G$ ,	modul smičnosti, $\text{GPa}$
$H$ ,	tvrdoća
$k$ ,	nagib krivulje
$K_{IC}$ ,	lomna žilavost, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$
$L$ ,	latentna toplina taljenja, $\text{kJ/kg}$
$L_0$ ,	početna mjerna duljina, $\text{mm}$
$m$ ,	masa, $\text{kg}$
$R_d$ ,	dinamička izdržljivost, $\text{MPa}$
$R_e$ ,	granica tečenja materijala pjene, $\text{MPa}$
$R_{et}$ ,	granica stlačivanja, $\text{MPa}$
$R_m$ ,	vlačna čvrstoća, $\text{MPa}$
$R_{mt}$ ,	tlačna čvrstoća, $\text{MPa}$
$s$ ,	skraćenje, $\text{mm}$
$S_0$ ,	ploština poprečnog presjeka, $\text{mm}$
$T_m$ ,	talište, $\text{K}$
$T_{\max}$ ,	maksimalna radna temperatura, $\text{K}$
$T_{\min}$ ,	minimalna radna temperatura, $\text{K}$
$v$ ,	brzina, $\text{m/s}$
$W$	– širina ispitivane ploče, $\text{m}$

$x$ ,      veličina relativnog skraćenja u točki D, mm/mm

$y$ ,      veličina tlačnog naprezanja u točki D, N/mm<sup>2</sup>

## GRČKE OZNAKE

$\alpha$ ,      koeficijent toplinske rastezljivosti, 1/K

$\gamma$ ,      električna vodljivost,  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

$\varepsilon$ ,      deformacija, sabijanje, relativno skraćenje, mm/mm ili %

$\varepsilon_0$ ,      relativno skraćenje, mm/mm

$\varepsilon_D$ ,      deformacija pri zgušnjavanju, mm/mm ili %

$\varepsilon_f$ ,      vlačna duktilnost

$\varepsilon_t$ ,      sabijanje, mm/mm

$\lambda$ ,      koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK

$\lambda_a$  – koeficijent toplinske vodljivosti zraka, W/mK

$\lambda_{effmin}$  – efektivna najmanja vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti, W/mK

$\lambda_{effmax}$  – efektivna najveća vrijednost, W/mK

$\lambda_s$  – toplinska vodljivost osnovnog metala, W/mK

$\nu$ ,      Poissonov faktor

$\rho$ ,      gustoća metalne pjene, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_s$ ,      gustoća neporoznog metala, kg/m<sup>3</sup>

$\rho/\rho_s$ ,      relativna gustoća

$\sigma$ ,      naprezanje, MPa

$\sigma_c$ ,      tlačno naprezanje, N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_t$ ,      tlačno naprezanje, N/mm<sup>2</sup>

## **SAŽETAK**

U prvom dijelu rada opisana su svojstva metalnih pjena sa naglaskom na toplinskim svojstvima, te su navedeni primjeri primjene metalnih pjena.

Cilj ovog diplomskog rada bio je istražiti ponašanje uzoraka okruglog profila, jednakog volumena i poroznosti, napravljenih od aluminijske pjene AlSi10 sa zatvorenim ćelijama, tijekom zagrijavanja odnosno hlađenja na različite temperature te ih usporediti sa aluminijskim žicama približno istog kemijskog sastava AlSi5.

Uzorci koji su izrađeni u Laboratoriju za nemetale ispitivani su na dilatogramu tijekom zagrijavanja na tri temperature (450, 300 i 140°C ) te kontinuiranog hlađenja. Promjene duljine su praćene i analizirane u dijagramima temperatura-dilatacija. Svakom uzorku je izračunat koeficijent dilatacije.

Uzorcima aluminijske žice je radi utvrđivanja strukturnih promjena uzrokovanih zagrijavanjem ispitana tvrdoća u Laboratoriju za ispitavanje mehaničkih svojstava FSB-a.

Ključne riječi: aluminijske pjene, toplinska dilatacija, zagrijavanje, hlađenje

## 1.UVOD

Metalne pjene su relativno nova vrsta i oblik materijala koji se razvijaju na osnovi oponašanja strukture i svojstava prirodnih ćelijastih materijala. Prednosti su im niska gustoća, relativno visoka krutost, dobra toplinsko-izolacijska svojstva, a nedostaci nedovoljno poznavanje svih svojstava i visoka cijena. Daljnjim istraživanjima i snižavanjem cijena u budućnosti metalne pjene će vjerojatno naći primjenu u svim granama industrije.

Dosada, po nama poznatim saznanjima, nije ispitano kako pjene reagiraju prilikom zagrijavanja odnosno hlađenja. Upravo to je bila ideja za diplomski rad u kojem bi ispitali toplinsku dilataciju pjena uz pomoć dilatometra.

Za praktični dio ovog rada u Laboratoriju za nemetale izrađeno je osamnaest uzoraka aluminijskih pjena jednakih dimenzija, sastava AlSi10 sa 50% poroznošću te je ispitano njihovo ponašanje na dilatometru A.D.A.M.E.L. DP 55 tijekom zagrijavanja i hlađenja. Ispitivanje je provedeno na temperaturama 450, 300 i 140°C. Na svakoj temperaturi ispitano je šest uzoraka aluminijskih pjena. Promjene duljine uzoraka pratile su se na dijagramu temperatura-dilatacija u programu LABview.

Radi usporedbe svojstava metalnih pjena i materijala bez poroznosti na dilatometru je ispitano ponašanje triju aluminijskih žica sa sličnim sastavom AlSi5. Jedna žica je zagrijana na 450°C, druga na 300°C, a treća na 140°C. Uspoređeni su i iznosi koeficijenata dilatacije svih uzoraka.

Kako bi se sa sigurnošću utvrdile strukturne promjene u aluminijskim žicama ili nepostojanje istih na uzorcima od žice su ispitane tvrdoće u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

## 2. PROIZVODNJA METALNIH PJENA

Metalne pjene nastaju iz taljevine ili praha. Samo upjenjavanje materijala se uvijek događa iz tekuće faze tako da se i prah dovodi u rastaljeno stanje. Izvor plina je nužan preduvjet za stvaranje praznina unutar rastaljenog metala. Stvaranje pjene može biti trenutno ili odgođeno.

Komercijalno su danas najčešće dostupne metalne pjene na bazi aluminijske (Al) i nikla (Ni), a proizvode se i pjene na bazi magnezija (Mg), olova (Pb), cinka (Zn), bakra (Cu), bronce, titana (Ti), čelika pa čak i zlata (Au).

Poznato je devet načina proizvodnje metalnih pjena

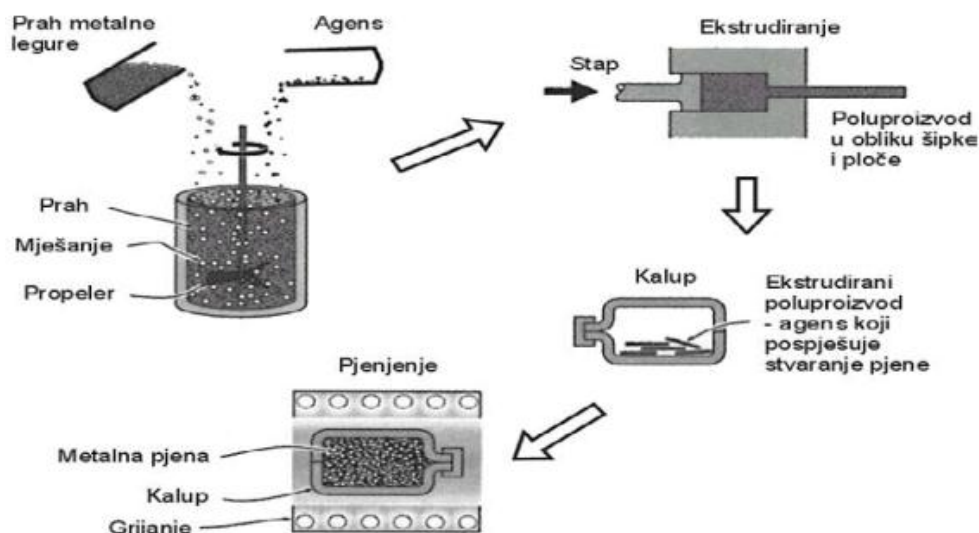
- Ubrizgavanje plina u taljevinu
- Plinom oslobođene čestice rastvorene u taljevini
- Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi
- Precizno lijevanje pomoću kalupa od voska ili polimera
- Taloženje metala na ćelijaste praoblake
- Eutektičko skrućivanje plin – metal
- Metalni ćelijasti materijali s kuglastim šupljinama
- Spajanje ili lijevanje dvaju materijala od kojih je jedan topljiv
- Ekspanzija plina u taljevini

Navedenim postupcima može se utjecati na oblik, veličinu i stupanj otvorenosti ćelija, kao i na relativnu gustoću. U ovom radu će biti opisan samo proizvodni postupak dobivanja pjena – plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi zato što su uzorci potrebni za ispitivanje napravljeni tom metodom.

### 2.1.1. Plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi

Pjenasti metali izrađuju se i od metalnog praha. Najprije se miješaju se prah čistog metala ili legure i dodatak koji pospješuje upjenjavanje ( $\text{TiH}_2$ .) Mješavina se potom sabija u poluproizvod u obliku šipke ili pločice. U metalnu matricu se sabija na razne

načine (izostatičko tlačjenje, ekstrudiranje, valjanje praha). Takav poluproizvod mora biti vrlo pažljivo napravljen zato što početna poroznost ili druge nepravilnosti uzrokuju loše rezultate u kasnijim fazama procesa. Poluproizvod se reže na male komade i stavlja u kalup gdje se zagrijava na temperaturu nešto višu od solidus temperature legure. Dodatak se raspada na Ti i plinoviti H<sub>2</sub> koji uzrokuje širenje i stvaranje visoko poroznog materijala. Trajanje procesa ovisi o temperaturi i veličini poluproizvoda i kreće se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Proizvod zadržava oblik kalupa, ima relativnu gustoću od 0,08 i više, te zatvorene ćelije promjera 1 do 5 mm. Ovaj postupak nije ograničen samo na aluminij, već se njime mogu proizvoditi pjene na bazi cinka, mjedi, olova, zlata i drugih metala ovisno o početnim parametrima. Upjenjavanje se događa u polučvrstom stanju zato što se TiH<sub>2</sub> raspada na 465 °C što je mnogo niže od tališta aluminija (660 °C). Sve to pospješuje upjenjavanje čvrstog aluminija koji se zatim zagrijava do taljenja, a hlađenjem se pjena stabilizira. Fraunhoferov institut u Bremenu (Institut für Advanced Materials - IFAM) razvio je izradu sendvič-konstrukcija ovim postupkom. Takve konstrukcije sastavljene su od jezgre od upjenjenog metala zatvorene s dva metalna lima (ploče) koji su ljepilom povezani s pjenom. Na slici 2.1. nalazi se shema proizvodnog postupka.



Slika 2.1. Proces nastajanja FOAMINAL-ALULIGHT metalne pjene, [1]



### 3. SVOJSTVA METALNIH PJENA

Svojstva materijala određena su kemijskim sastavom, strukturom, te načinom izrade i obrade, a značajan utjecaj imaju dimenzije te način pripreme uzorka za ispitivanje. Metalne pjene posjeduju vrlo nepravilnu tj. kaotičnu građu i zbog toga, prilikom istog načina ispitivanja, rezultati često variraju i za nekoliko desetaka postotnih iznosa što smanjuje kredibilitet metalne pjene u direktnoj primjeni. Zbog toga se ispitivanja metalnih pjena provode po mnogo strožim kriterijima nego kod materijala bez poroznosti.

#### 3.1 Mehanička svojstva metalnih pjena

Najveća prednost metalnih pjena u odnosu na metale od kojih su dobivene je njihova vrlo mala masa što rezultira izradom izrazito lakih konstrukcija kojima se danas teži zato što se njima ostvaruju uštede u masi i druge prednosti. Svaka konstrukcija za vrijeme svog radnog vijeka je pod utjecajem statičkih i dinamičkih mehaničkih opterećenja, toplinskih opterećenja te ostalih naprezanja koja u krajnjem slučaju mogu dovesti do loma konstrukcije. Da bi se mogao izabrati podoban materijal za neku konstrukciju, potrebno je što točnije odrediti mehanička svojstva metalnih pjena, kao što su [1] :

- tlačna čvrstoća
- vlačna čvrstoća
- modul elastičnosti
- modul smičnosti
- dinamička izdržljivost
- tvrdoća
- otpornost na umor
- otpornost na puzanje

Tablica 3.1. Izrazi za određivanje vrijednosti mehaničkih svojstava metalnih pjena [1]

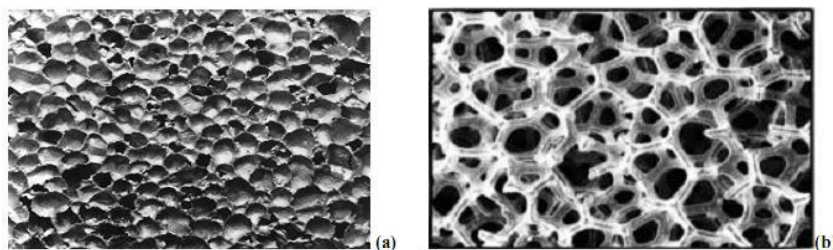
Mehaničko svojstvo	Otvorene ćelije	Zatvorene ćelije
Modul elastičnosti, (GPa), $E$	$E = (0,1-4) \cdot E_s \cdot (\rho/\rho_s)^2$	$E = (0,1-1) \cdot E_s \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^2 + 0,3(\rho/\rho_s))$
Modul smičnosti, (GPa), $G$	$G \approx (3/8) \cdot E$	
Modul savitljivosti, (GPa), $E_f$	$E_f \approx E$	
Tlačna čvrstoća, (MPa), $R_{mt}$	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{mts} \cdot (\rho/\rho_s)^{3/2}$	$R_{mt} = (0,1-1) \cdot R_{mts} \cdot (0,5(\rho/\rho_s)^{2/3} + 0,3(\rho/\rho_s))$
Vlačna čvrstoća, (MPa), $R_m$	$R_m \approx (1,1-1,4) \cdot R_{mt}$	
Dinamička izdržljivost, (MPa), $R_d$	$R_d \approx (0,5-0,75) \cdot R_{mt}$	
Deformacija pri zgušćivanju, $\epsilon_D$	$\epsilon_D = (0,9-1) \cdot (1-1,4\rho/\rho_s + 0,4(\rho/\rho_s)^3)$	
Koeficijent gubitka, $\eta$	$\eta \approx (0,95-1,05) \cdot \eta_s / (\rho/\rho_s)$	
Tvrdoća, $H$	$H = R_{mt} \cdot (1 + 2\rho/\rho_s)$	
Toplinska vodljivost, (W/mK), $\lambda$	$(\rho/\rho_s)^{1,8} < \lambda/\lambda_s < (\rho/\rho_s)^{1,65}$	
Električni otpor, ( $10^{-8} \Omega m$ ), $R$	$(\rho/\rho_s)^{-1,6} < R/R_s < (\rho/\rho_s)^{-1,85}$	

Napomena: Indeks "s" u oznaci odnosi se na svojstva osnovnog materijala

Tablica 3.2. Mehanička svojstva metalnih pjena [1]

Svojstvo, (jedinica), simbol	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	INCO
Materijal	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
Relativna gustoća, $\rho/\rho_s$	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Struktura, (tip ćelije)	Zatvorene			Otvorene	
Modul elastičnosti, (GPa), $E$	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modul smičnosti, (GPa), $G$	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Modul savitljivosti, (GPa), $E_f$	0,03-3,3	1,7-12	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Poissonov faktor	0,32-0,34				
Tlačna čvrstoća, (MPa), $R_{mt}$	0,04-7,0	1,9-14	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Vlačna čvrstoća, (MPa), $R_m$	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Din. izdržljivost, (MPa), $R_d$	0,02-3,6	0,95-13	0,9-1,0	0,45-1,5	0,3-0,6
Deformacija pri zgušćivanju, $\epsilon_D$	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Vlačna duktilnost, (-), $\epsilon_f$	0,01-0,02	0,002-0,04	0,01-0,06	0,1-0,2	0,03-0,1
Faktor gubitka, (%), $\eta$	0,4-1,2	0,3-0,5	0,9-1,0	0,3-0,5	1,0-2,0
Tvrdoća, $H$	0,05-10	2,4-35	2,0-22	2,0-3,5	0,6-1,0
Lomna žilavost, (MPa·m <sup>1/2</sup> ), $K_{IC}$	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0

Metalne pjene imaju širok raspon svojstava tako da im je i veliko područje potencijalne primjene u uvjetima mehaničkog opterećenja. Kada se usporede pjene s otvorenim i zatvorenim ćelijama, vidljivo je da su im mehanička svojstva uglavnom na jednakoj razini, no otvorene ćelije imaju ipak nešto niže vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće. Na slici 3.1. nalaze se fotografije unutrašnjih presjeka metalnih pjena sa zatvorenim i otvorenim ćelijama.



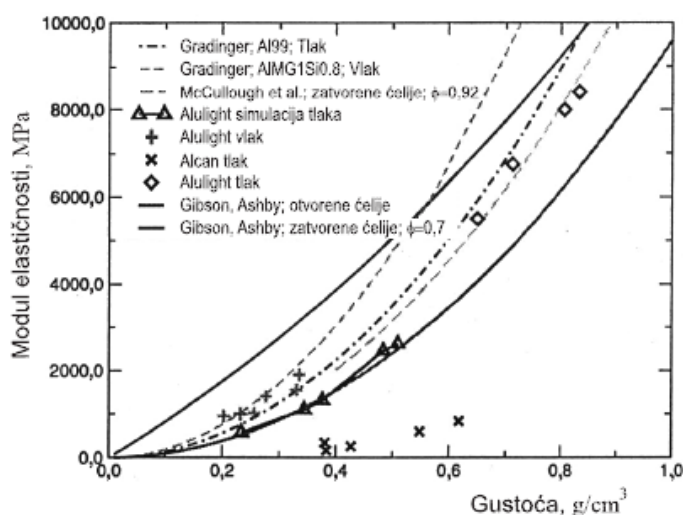
Slika 3.1. Metalne pjene sa a) zatvorenim ćelijama [1]

b) otvorenim ćelijama

[1]

### 3.1.1. Krutost

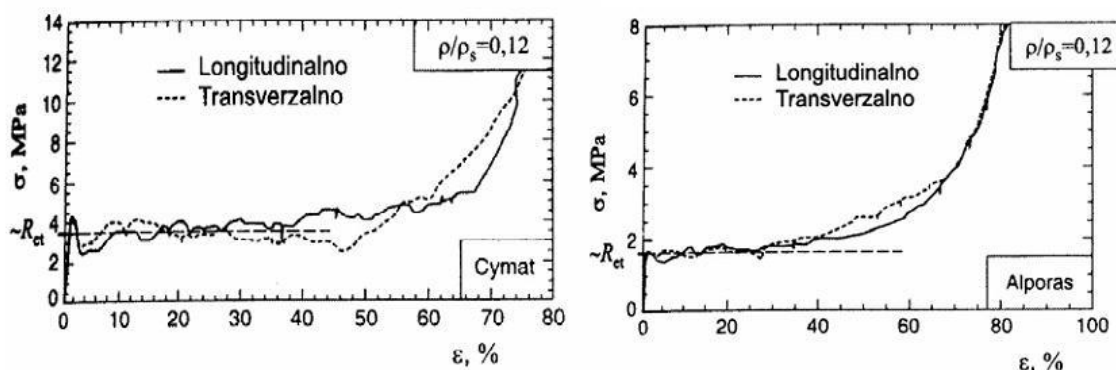
Uobičajeno je da čvrstoća i krutost ćelijastih (poroznih) materijala u značajnoj mjeri ovise o njihovoj gustoći. Teorijske pretpostavke, koje se postavili Gibson i Ashby o mehaničkim svojstvima ćelijastih materijala, zasnivaju se na vezi između morfologije ćelija i svojstava stijenki ćelija. Kod metalnih pjena s otvorenim ćelijama takve pretpostavke odgovaraju podacima utvrđenim ispitivanjem, dok kod pjena sa zatvorenim ćelijama to nije slučaj. Aluminijske pjene pokazuju različit modul elastičnosti pri vlačnom i tlačnom opterećenju. Bit ove pojave otežava činjenica da početna krutost uzoraka pri neosnom tlačnom opterećenju ne karakterizira ponašanje samog materijala, već ponajprije ispitivanog uzorka. Početna krutost ispitivanog uzorka iznosi 20% vrijednosti modula elastičnosti koji se dobiva na osnovi krivulja opterećivanje/rasterećivanje uzorka nakon dosezanja granice stlačivanja (Ret). Slika 3.2. pokazuje rezultate ispitivanja modula elastičnosti Al pjene sa zatvorenim ćelijama.



Slika 3.2. Ovisnost modula elastičnosti o gustoći Al pjene, neosno opterećeno na tlak i regresijske krivulje iz literature [2]

### 3.1.2. Tlačna čvrstoća

Slika 3.3. prikazuje dijagram “naprezanje-skraćenje” pri tlačnom opterećenju i dvije krivulje realnih Al pjena.



Slika 3.3. Tipični dijagrami "naprezanje-deformacija" metalnih pjena pri tlačnom opterećenju [2]

Početno opterećenje izaziva elastičnu deformaciju. Neke ćelije počinju teći već pri vrlo malim opterećenjima pa početna linija nije pravac i manjeg je nagiba od nagiba koji odgovara stvarnom modulu elastičnosti. Modul elastičnosti pri tlačnom opterećenju je za 10% niži od modula elastičnosti pri vlačnom opterećenju. Anizotropija oblika ćelija dovodi do bitnih razlika (30%) između modula elastičnosti u različitim smjerovima.

Empirijske veze između granice stlačivanja, deformacije zgušnjavanja i relativne gustoće izražene su u obliku [2] :

$$R_{et} = (0,25 - 0,35) \cdot R_e \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^m \quad 3.1.$$

$$\varepsilon_D \approx \left( 1 - \alpha_1 \cdot \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad 3.2.$$

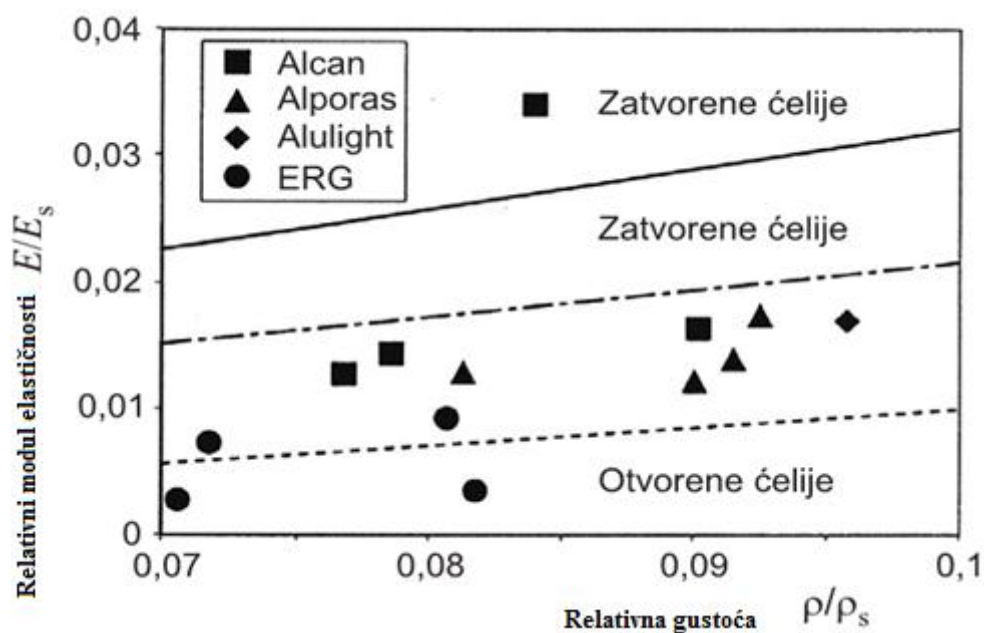
$R_{et}$ - granica stlačivanja (engl.plateau stress)

$\varepsilon_D$ - konačna deformacija zgušnjavanja

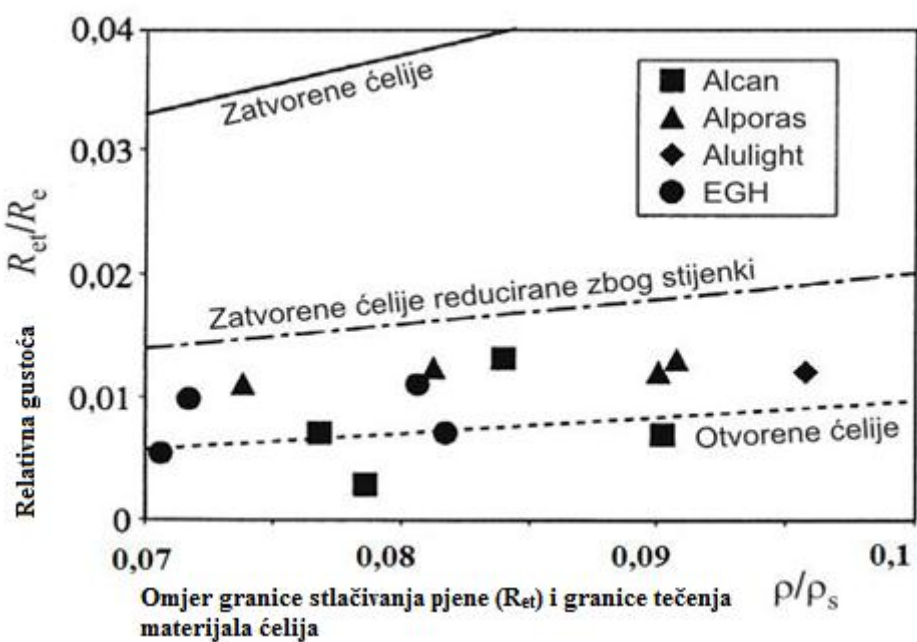
$R_e$ - granica tečenja materijala pjene

$m$ - eksponent koji iznosi 1,5-2

$\alpha_1$  – koeficijent koji se kreće u rasponu 1,4-2,0



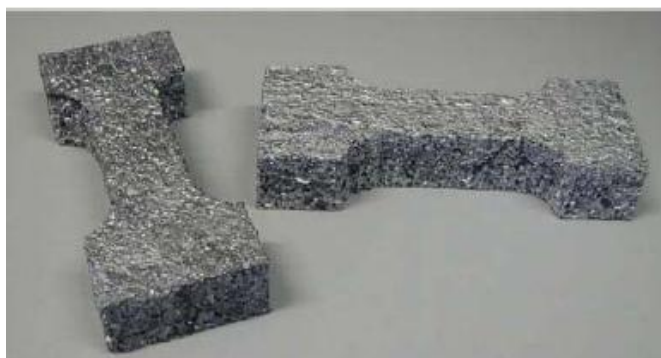
Slika 3.4. Ovisnost relativnog modula elastičnosti o relativnoj gustoći [1]

Slika 3.5. Ovisnost omjera granice stlačivanja pjene ( $R_{et}$ ) i granice tečenja materijala ćelija ( $R_e$ ) o relativnoj gustoći [1]

### 3.1.3. Vlačna čvrstoća

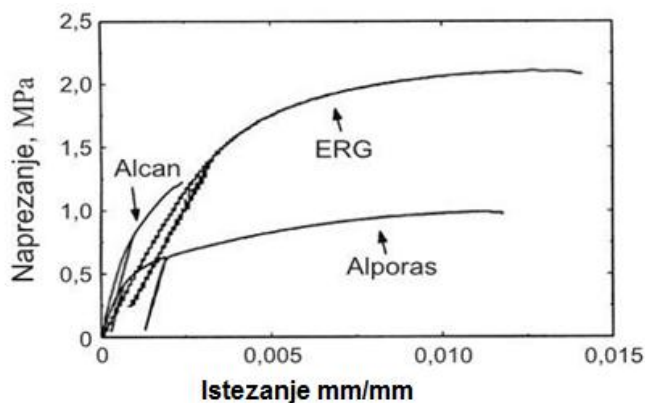
Vlačna čvrstoća ispituje se na epruvetama u obliku kosti ili u obliku cilindra.

ASTM E8 - 96a norma propisuje odvajanje i obradu uzoraka. Za glavne dimenzije uzoraka uzimaju se debljina kod uzorka u obliku pseće kosti (prikazani na Slici 3.6.) i promjer kod cilindričnog.



Slika 3.6 Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u obliku kosti [3]

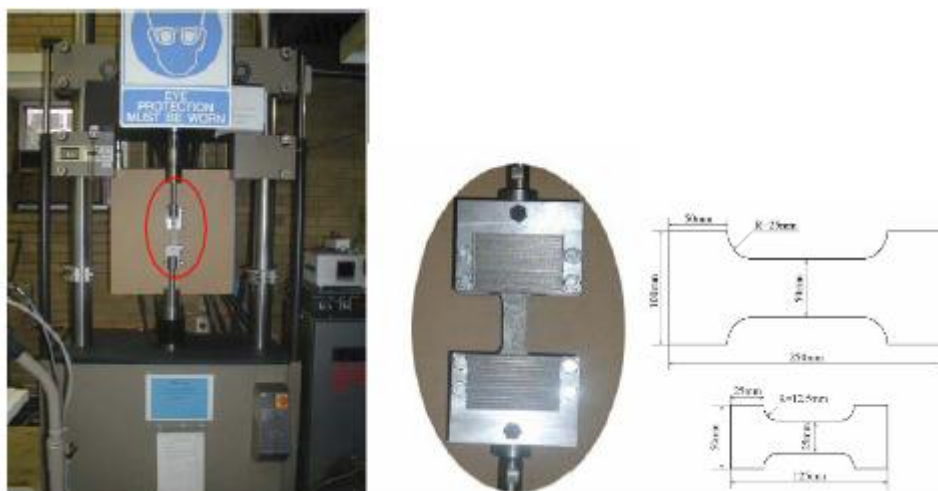
Omjer tih dimenzija i veličine ćelije mora biti veći od 7. Ekstenzimetrom se mjeri istezanje tako da se ekstenzimetar pričvrsti na dio uzorka gdje dolazi do lomova. Videoekstenzimetra ili laserskim ekstenzimetrom vrše se varijacije ispitivanja. Pomoću videoekstenzimetra, koji sadrži digitalnu kameru bilježe se deformacije uzorka s urezom i poprečno istezanje uzorka bez ureza, te se uočavaju inicijalne napukline u materijalu i njeno širenje. Laserski ekstenzimetar, upotrebom laserske zrake koja prelazi po uzorku duž glavne osi, mjeri deformacije iz kojih se računa istezanje. Slika 3.7. pokazuje dijagram naprežanja-istezanja Al pjena.



Slika 3.7. Dijagram naprežanje-istezanje Al pjena [1]



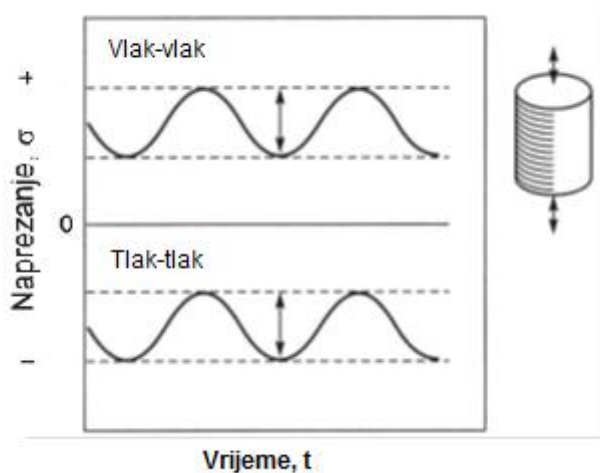
Navedena ispitivanja pokazuju da je ponašanje metalnih pjena i žilavih metala vrlo slično. Linearno područje manje je od plastičnog područja te se i prijelaz u plastično područje događa pri nižim naprezanjima. Objašnjenje za to pronalazimo u nehomogenosti građe na koju utječu pogreške u stijenkama ćelija. Na slici 3.8 prikazani su uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće metalnih pjena.



Slika 3.8. Uređaj i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće napravljeni od CYMAT metalne pjene, [3]

### 3.1.4. Ponašanje pri promjenjivom opterećenju - umor

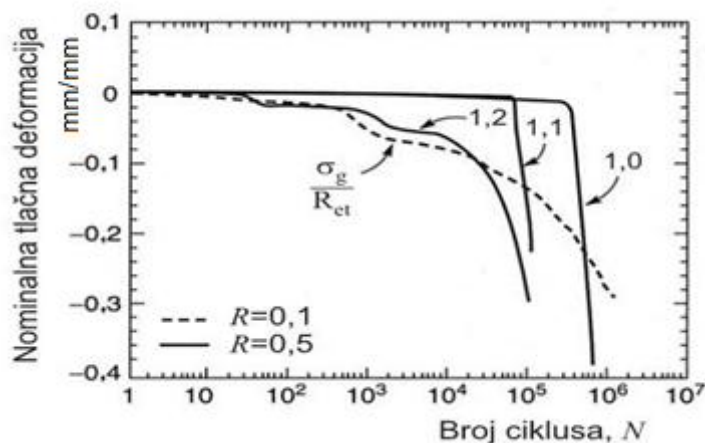
Umor materijala je dugotrajno djelovanje promjenjivog (dinamičkog) naprezanja zbog kojeg dolazi do postupnog razaranja materijala te na kraju prijeloma. Dinamička izdržljivost je mehaničko svojstvo koje karakterizira otpornost materijala na umor materijala. Ciklička opterećenja mogu biti tlačnog i vlačnog karaktera i oba načina variraju od minimalne  $\sigma_d$  do maksimalne  $\sigma_g$  vrijednosti kao što je pokazano na slici 3.9. U tom je slučaju uzorak cilindričnog oblika.



Slika 3.9. Vrste dinamičkih opterećenja [3]

Pri djelovanju promjenjivog naprezanja metalne pjene se mogu ponašati na tri različita načina.

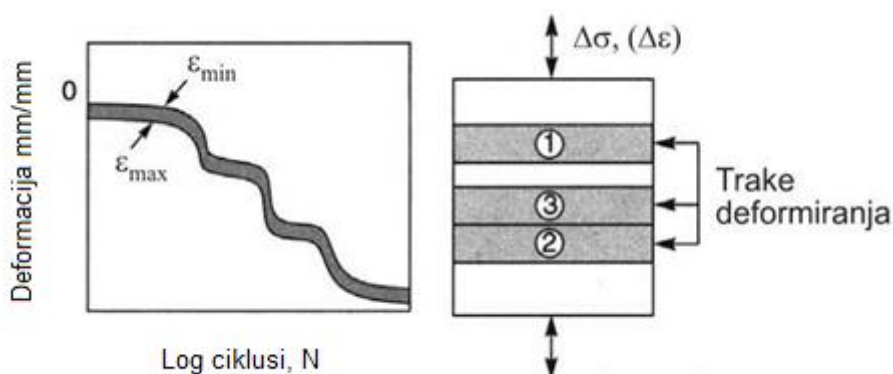
Prvi način: Iako se u materijalu akumuliraju deformacije, nisu vidljivi znaci širenja lomnog područja. Na slici 3.10. prikazana je ovisnost deformacije izazvane tlačnim opterećenjem o broju ciklusa ponavljanja.



Slika 3.10. Način 1. Skraćenje Duocel Al—6101-T6 pjene u uvjetima umora izazvanog tlačnim opterećenjima [2]

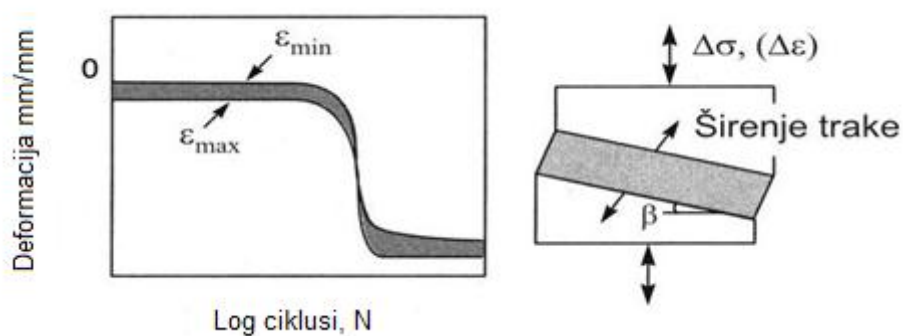
Drugi način: Lomna područja stvaraju se na nepredvidivim unutarnjim stranama materijala. Napukline prvo nastaju na najslabijem dijelu, a trajanjem opterećenja lomna područja se razvijaju po cijelom materijalu. Ovaj tip ponašanja prikazuje slika 3.11.





Slika 3.11. Način 2. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [4]

Treći način: Zbog djelovanja opterećenja stvara se jedna napuklina u obliku trake i širi se preko cijelog materijala što je vidljivo na slici 3.12.



Slika 3.12. Način 3. Ponašanja metalnih pjena u uvjetima dinamičkog opterećenja [4]

### 3.1.5. Osjetljivost na ureze

Dijelovi se izrađuju s provrtima ili urezima zbog funkcionalnosti. Eksperimentalno je potvrđeno da pjene nisu osjetljive na ureze ili provrte ako je opterećenje statički tlačno, a može se izraziti formulom [2] :

$$\sigma = R_{mt} (1 - (D/W)) \quad 3.3.$$

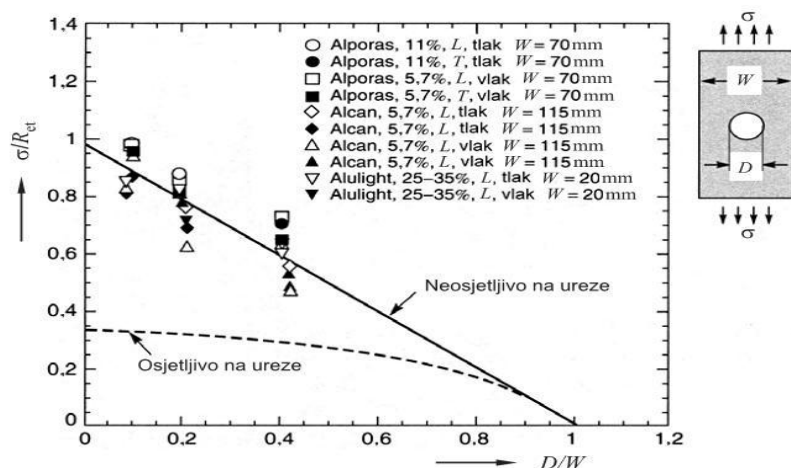
gdje je:  $\sigma$  – nominalno naprezanje,

$R_{mt}$  – tlačna čvrstoća,

$W$  – širina ispitivane ploče

$D$  – promjer provrta.

Slika 3.35. prikazuje čvrstoću metalnih pjena u slučaju postojanja provrta.



Slika 3.13. Čvrstoća kod postojanja provrta u uvjetima tlačnog i vlačnog opterećenja [2]

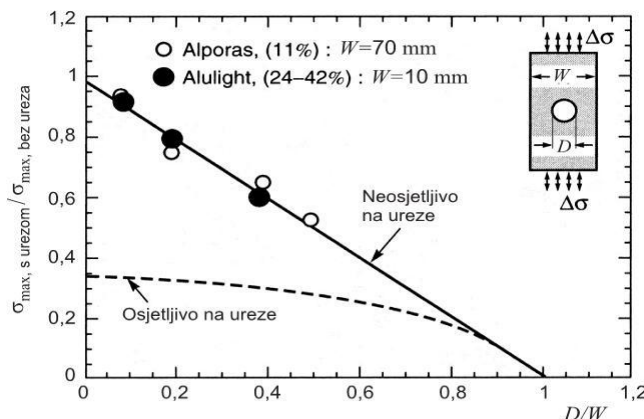
Pri određivanju osjetljivosti na ureze u uvjetima tlak-tlak promjenjivog opterećenja potrebno je odrediti maksimalno naprezanje na uzorku s urezom ili provrtom, a na osnovi geometrije uzorka i maksimalnog naprezanja na uzorku bez ureza [2] :

$$\sigma_{max, p} = (1 - (D/W)) \sigma_{max, bp} \quad 3.4.$$

gdje je:  $\sigma_{max, p}$  – maksimalno naprezanje uzorka s provrtom

$\sigma_{max, bp}$  – maksimalno naprezanje uzorka bez provrta.

Moguća su dva mehanizma loma: krhko ponašanje kada zbog izjednačenja lokalnih naprezanja s vlačnom čvrstoćom dolazi do loma na rubu provrta, ili žilavo ponašanje; plastičnost u blizini provrta dovoljna je da razgradi koncentraciju elastičnih naprezanja koja može dovesti do loma. Slika 3.14. prikazuje čvrstoću u uvjetima promjenjivog tlačnog opterećenja pjena s provrtom.



Slika 3.14. Ureznja čvrstoća u uvjetima tlačnog promjenjivog opterećenja ( $R = 0,1$ ) uz praktički beskonačan broj ciklusa na pjenama s provrtom [2]

### 3.1.6 Ponašanje pri puzanju

Puzanje je toplinski aktivirani ireverzibilni proces pri kojem dolazi do deformacije materijala dugotrajnim utjecajem konstantnog opterećenja pri nekoj konstantnoj povišenoj temperaturi. Puzanje ovisi o temperaturi tališta, mikrostrukтури, vrsti atomske veze i kristalne rešetke. Glavni mehanizam puzanja je kombinacija naprezanja i temperature, kod malih naprezanja i visokih temperatura ( $T/T_m > 0.8$ ) tijekom difuzije atoma duž granica zrna ili unutar zrna može postati dominantni mehanizam, dok pri višim naprezanjima i nižim temperaturama ( $0.3 < T/T_m < 0.8$ ) dominantni mehanizam je gibanje dislokacija.

Puzanje metalnih pjena nužno je proučiti zato što se one vrlo često koriste kao jezgre sendvič-konstrukcija koje su u eksploataciji izložene visokim temperaturama. Puzanje pjena modelirano je korištenjem znanja o izobličenju i istezanju stijenki ćelija zbog puzanja. Danas postoje matematički modeli koji opisuju proces puzanja kod metalnih pjena. Pretpostavlja se da je brzina puzanja pjena u drugom stadiju ovisna o početnoj brzini puzanja i nametnutom napreznju, a određena je sljedećim empirijskim izrazom [3] :

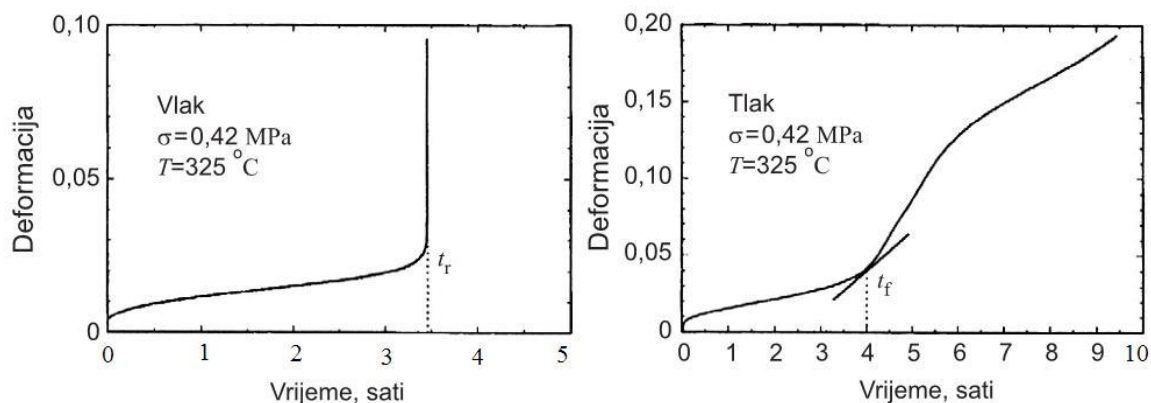
$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad 3.5.$$

Gdje je:

$$\dot{\varepsilon}_0 = A \exp \left( - \frac{Q}{RT} \right) \quad 3.6.$$

$Q$  je energija aktivacije za kinetičke procese koji kontroliraju brzinu puzanja,  $\sigma_0$  je referentno napreznje,  $R$  je konstanta idealnog plina. [6]

Slika 3.15. pokazuje krivulje puzanja ALPORAS pjene u uvjetima vlačnog i tlačnog opterećenja.



Slika 3.15. Krivulje puzanja ALPORAS pjene u uvjetima vlačnog i tlačnog opterećenja

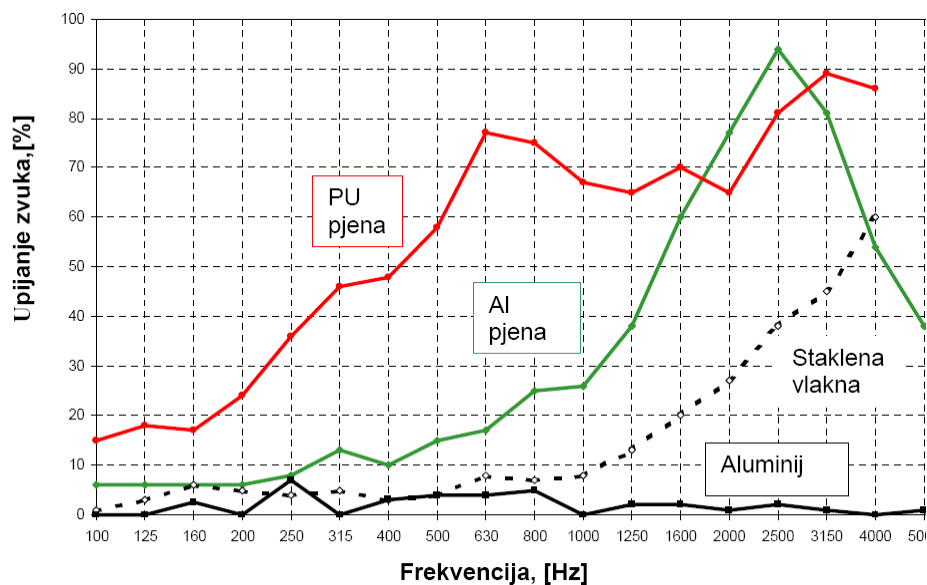
### 3.2. Ostala svojstva

#### 3.2.1. Zvučna svojstva metalnih pjena

Odlična zvučna svojstva metalnih pjena očituju se u činjenici da metalne pjene apsorbiraju veliku količinu energije. Da bi metalna pjena dobro apsorbirala zvuk mora imati otvorene ili poluotvorene ćelije.

Apsorpcija zvuka može se poboljšati bušenjem rupa promjera 1 - 2 mm u metalnoj pjeni. Prema podacima proizvođača, prednosti Alporas pjena u odnosu prema konkurentnoj staklenoj vuni kada se radi o apsorpciji buke su :

- staklena vuna nije dovoljno kruta tako da se mora stabilizirati metalnom armaturom što nije slučaj kod Alporas pjene;
- vlakna staklene vune mogu biti uništena pod utjecajem vibracija i vjetra;
- staklena vuna pod utjecajem visoke temperature oslobađa otrovne plinove;
- staklena vuna puno brže upija vlagu;
- Alporas pjena se lakše montira zbog svoje vrlo male mase.



Slika.3.16. Upijanje zvuka PU pjene, Al pjene, staklene vune i Al [3]

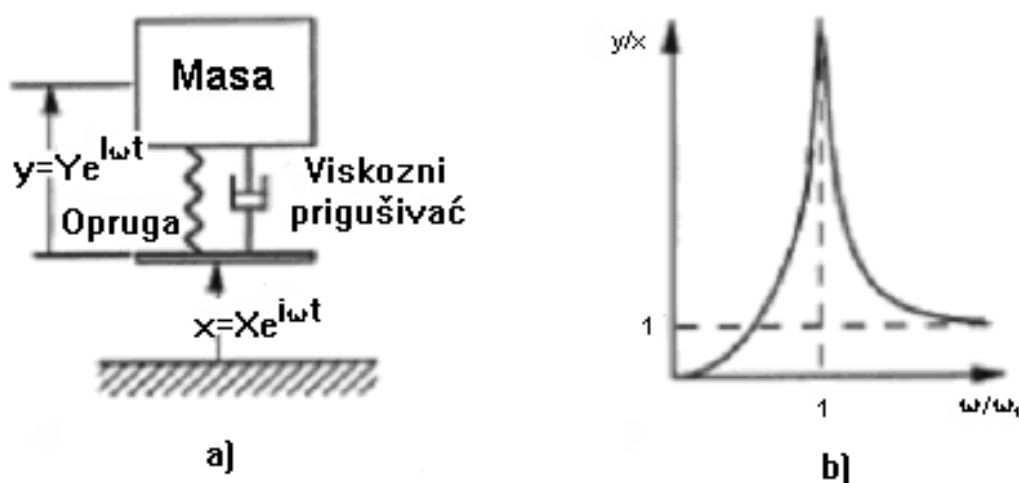
Dijagram pokazuje da Al pjena na frekvenciji od oko 2500 Hz ima postotak upijanja zvuka 95%, što je čak desetak posto više od već odavno poznate PU pjene, a puno više od staklene vune koja se često koristi u građevinarstvu.

### 3.2.2. Prigušenje vibracija metalnih pjena

Prigušenje je vrlo važno svojstvo materijala kada se on koristi za izradu dijelova neke konstrukcije koja je tijekom uporabe izložena mehaničkim vibracijama (npr. dijelovi stroja za preciznu obradu itd.). Ponašanje konstrukcije posebno je kritično u području rezonantnih ili vlastitih frekvencija. Konstrukcijsko prigušenje temelji se na pretvorbi vibracijske energije u toplinu unutrašnjim trenjem.

Princip ispitivanja je takav da se materijal izloži vibracijama te se proučava ponašanje u rezonanciji nakon prestanka rada izvora vibracije. Kao i kod drugih ispitivanja, i ovdje je problem nehomogena struktura uzoraka. Na rezultate utječe stupanj poroznosti, veličina i oblik ćelija, način obrade uzorka itd. Ispitivanja se najčešće obavljaju na oscilatoru s jednim stupnjem slobode na kojem se vibracije različite frekvencije prenose na uzorak putem opruge

Prigušenje se iskazuje bezdimenzijskim faktorom gubitka  $\eta$ . Čelijasti metali pokazuju za jedan red veličine više vrijednosti faktora gubitka od faktora gubitka materijala pune gustoće od kojih su napravljeni.



Slika.3.17. a) Vibrirajuća masa s jednim stupnjem slobode; b) funkcija prigušenja [2]

### 3.2.3. Električna svojstva metalnih pjena

Metali sa ćelijastom strukturom su odlični električni vodiči. Dva glavna električna svojstva su:

- električni otpor
- električna vodljivost

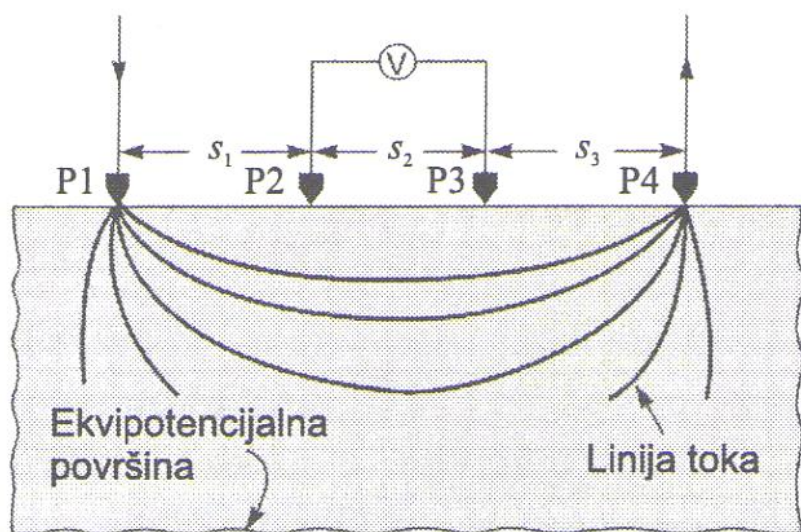
Električni otpor (znak:  $R$ ) – je fizikalna veličina kojom se izražava omjer napona i jakosti električne struje, što je za mnoge materijale stalna vrijednost (Ohmov zakon).

Električna vodljivost (znak:  $G$ ) fizikalna je veličina definirana kao omjer jakosti električne struje i napona ukoliko su oni nepromjenljivi s vremenom (istosmjerna električna struja i napon), a obrnuto je proporcionalna električnom otporu. Kod metalnih pjena ovisna je i o relativnoj gustoći jer proizlazi iz električne otpornosti. Tablica 3.3 pokazuje vrijednosti električne otpornosti metalnih pjena.

Tablica 3.3. Električna otpornost metalnih pjena [4]

SVOJSTVO	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relativna gustoća	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-1,0	0,05-0,1	0,03-0,04
Grada	Zatvorene			Otvorene	
Električna otpornost, ( $10^{-8} \Omega\text{m}$ )	90-3000	20-2000	210-250	180-450	300-500

Način mjerenja električnog otpora prikazan je na slici 3.18.



Slika.3.18. Mjerenje električnih svojstava metalnih pjena kontaktom u četiri točke [5]

#### 4. PRIMJENA METALNIH PJENA

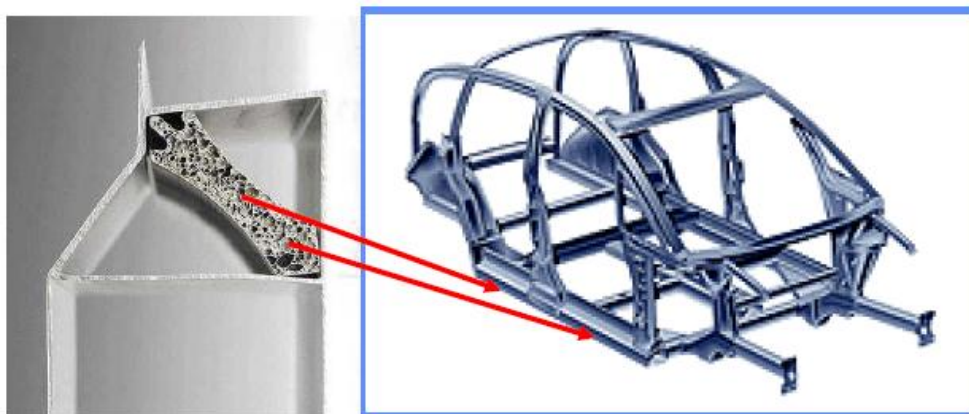
Budući da su metalne pjene relativno novi oblik materijala, njihova primjena još uvijek nije u potpunosti raširena zbog nedovoljno istraženih svojstava, iako već i danas postoji nekoliko respektabilnih proizvođača ove vrste materijala. Loša strana metalnih pjena je njihova visoka cijena, no ona se neprestano smanjuje. Tablica 4.1. pokazuje neke od mogućih područja primjene metalnih pjene i obrazloženje svojstava.

Tablica 4.1. Moguća primjena metalnih pjena [4]

PODRUČJE PRIMJENE	OBRAZLOŽENJE
Lagane konstrukcije	Odličan omjer krutosti i težine pri savijanju
Jezgra sendvič konstrukcija	Niska gustoća i dobra smična i lomna čvrstoća
Prigušenje vibracija	Prigušenje vibracija je i do 10 puta bolje nego kod neporoznih metala
Apsorpcija zvuka	Metalne pjene s mrežastom strukturom
Apsorpcija energije	Vrlo dobra apsorpcija udarne energije pri sobnim i povišenim temperaturama
Zamjena za drvo	Lagane su, krute i mogu se spajati drvenim vijcima
Izmjenjivači topline, hladnjaci	Pjene s otvorenim ćelijama dobro provode toplinu zbog velike površine i vodljivosti stijenki
Vatrootpornost	Pjene sa zatvorenim ćelijama - stjenke prekrivene slojem oksida
Toplinska izolacija	Određene vrste pjena imaju niski koeficijent toplinske vodljivosti

Najveće zanimanje za primjenu metalnih pjena pokazuje autoindustrija (slika 4.1).





Slika 4.1. Primjena metalnih pjena u autoindustriji [1]

Ako pjena ima otvorene ćelije, ona će dobro provoditi toplinu, a ako su ćelije zatvorene, ona je toplinski izolator. Pjene s otvorenim ćelijama, zbog svoje velike površine i dobre toplinske vodljivosti stijenki, dobro provode toplinu i mogu se primijeniti za izradu izmjenjivača topline, hladnjaka itd. (Slika 4.2.)



Slika 4.2. Izmjenjivač topline [3]

## 5. TOPLINSKA SVOJSTVA METALNIH PJENA

Gotovo sva svojstva metalnih pjena dovode se u vezu s njihovom vrlo malom masom, pa tako i toplinska. Osim male mase nužno je postići i toplinsko-izolacijska svojstva kako bi pjene bile primjenjive u eksploatacijskim uvjetima gdje su prisutne povišene ili snižene temperature. Postoje velike razlike u svojstvima pjena s otvorenim i zatvorenim ćelijama. Unapređenje procesa proizvodnje i njegova bolja kontroliranost omogućuje postizanje boljih toplinskih svojstava.

U tablici 5.1. navedene su vrijednosti toplinskih svojstava komercijalno dostupnih pjena.

Tablica 5.1. Toplinska svojstva metalnih pjena [6]

SVOJSTVO, SIMBOL, JEDINICA,	MATERIJAL				
	CYMAT Al-SiC	ALULIGHT Al	ALPORAS Al	ERG Al	INCO Ni
Relativna gustoća	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-1,0	0,05-0,1	0,03-0,04
Građa	Zatvorene ćelije			Otvorene ćelije	
Talište, $T_m$ , K	830-910	840-850	910-920	830-920	1700-1720
Maks. radna temperatura, $T_{max}$ , K	500-530	400-430	400-420	380-420	550-650
Min. radna temperatura, $T_{min}$ , K	1 - 2				
Specifični topl. kapacitet, $C_p$ , J/kgK	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Toplinska vodljivost, $\lambda$ , W/mK,	0,3-10	3,0-35	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Toplinska rastezljivost, $\alpha$ , $10^{-6}/K$ ,	19-21	19-23	21-23	22-24	12-14
Latentna toplina taljenja, kJ/kg, $L$	355-385	380-390	370-380	380-395	280-310

Talište -  $T_m$  ćelijastih materijala praktički je jednako talištu materijala ćelija. Kod Al pjena talište je više od tališta aluminija jer su ćelije često prevučene kontinuiranim oksidnim slojem. Što je veća poroznost i manja veličina ćelija, to je veća površina prevučena oksidom, pa je i talište više.

Specifični toplinski kapacitet -  $C_v$  po jedinici obujma za ćelijaste je materijale značajno niži nego kod neporoznih. To ih čini prikladnima za primjenu kada se traži mali toplinski kapacitet, na primjer za dijelove sustava za brza zagrijavanja i hlađenja.

Koeficijent toplinske rastezljivosti -  $\alpha$  ćelijastih materijala gotovo je jednak koeficijentu materijala stijenki ćelija. Kako je koeficijent toplinske vodljivosti za pjene ( $\lambda$ ) znatno niži, omjer koeficijenta toplinske rastezljivosti i toplinske vodljivosti ( $\alpha/\lambda$ ) je visok. Budući da je taj omjer mjerilo za veličinu toplinskih deformacija, kod konstrukcija s ugrađenim pjenama treba svesti na minimum pojavu temperaturnih razlika.

S druge strane, otpornost na toplinske šokove -  $Rm/(E\alpha)$  nije tako jednoznačno objašnjivo svojstvo. Kod pojave iznenadnih temperaturnih razlika dolazi do toplinskih deformacija čija veličina ovisi o modulu elastičnosti. Ako se uzme da je koeficijent toplinske rastezljivosti konstantan, a budući da modul elastičnosti ćelijastih materijala opada s opadanjem relativne gustoće, to će toplinske deformacije ćelijaste strukture biti u načelu manje nego kod neporoznih materijala. Dakako, s padom relativne gustoće pada i naprezanje urušavanja i lomno naprezanje pjena. Ako ta naprezanja u odnosu na relativnu gustoću padaju blaže od pada modula elastičnosti u odnosu na relativnu gustoću, onda će otpornost na toplinske šokove takvih pjena biti veća.

U daljnjem tekstu podrobnije će se analizirati: koeficijent toplinske vodljivosti, prijelaz topline, vatrootpornost i otpornost na eksploziju (pad tlaka) i dr.

### 5.1. Koeficijent toplinske vodljivosti

Izolacijske sposobnosti materijala najbolje pokazuje koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$ . Koeficijent toplinske vodljivosti iznosi za aluminij 150-220 W/mK, a za nemetalne materijale približno 3 W/mK, jasno je da metalne pjene mogu biti vrlo dobar izolator.  $\lambda$  aluminijskih pjena je od 8 pa čak i do 100 puta manja od toplinske vodljivosti čistog aluminija.

Na toplinsku vodljivost poroznih struktura utječu četiri faktora: [6]

$$\lambda = \lambda_m + \lambda_G + \lambda_c + \lambda_r \quad 5.1.$$

gdje indeksi znače doprinose toplinskoj vodljivosti:  $m$  - čvrstog materijala ćelija,  $G$  – plina unutar ćelija,  $c$  - konvekcije unutar ćelija  $r$  – zračenja između ćelija.

Doprinos toplinske vodljivosti osnovnog metala izražava se empirijskom relacijom [6 :

$$\lambda_m = \lambda_s (\rho/\rho_s)^2 \quad 5.2.$$

gdje je  $\lambda_s$  koeficijent toplinske vodljivosti materijala čelija.

Doprinos provođenja kroz plin unutar čelija vrlo je malen u usporedbi s provođenjem kroz metal. Zračenje kroz netransparentne metale čelija nije moguće pa nema  $\lambda_r$  doprinosa kod metalnih pjena.

Može se s pomoću matematičkih modela izračunati najmanja i najveća vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti. Donja granica je izražena na temelju pretpostavke kako aluminij i zrak unutar čelija provode toplinu u nizu, a gornja granica na temelju saznanja kako istodobno provode toplinu.

$$\lambda_{\text{eff min}} = \frac{\lambda_a}{1 + \Pi \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_a} - 1 \right)} \quad 5.3.$$

$$\lambda_{\text{eff max}} = \frac{\lambda_a}{1 + \Pi \left( 1 - \frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right)} \quad 5.4.$$

$$\Pi = \frac{V - \frac{m}{\rho_s}}{V} \quad 5.5.$$

gdje je:

$\lambda_{\text{eff min}}$  – efektivna najmanja vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti,  $\lambda_{\text{eff max}}$  – efektivna najveća vrijednost,  $\lambda_s$  – toplinska vodljivost osnovnog metala,  $\lambda_a$  – koeficijent toplinske vodljivosti zraka,  $\Pi$  – poroznost,  $V$  – obujam,  $m$  – masa,  $\rho_s$  – gustoća osnovnog metala.

Ako se pretpostavi da su čelije ravnomjerno raspodijeljene i da na spojevima dviju faza nema toplinskog otpora, vrijedi sljedeće [6]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_s \left[ 1 + \frac{1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_a}}{1 + \Pi^{1/3} \left( 1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right)} \right] \quad 5.6.$$

gdje je  $\lambda_s \gg \lambda_a$ .

Ako su ćelije kuglastog oblika i ako je omjer  $\lambda_s/\lambda_a$  velik, vrijedi [6]:

$$\lambda_{\text{eff}(1)} = \lambda_s (1 - \Pi^{2/3}) \quad 5.7.$$

Ako zrak prividno okružuje osnovni metal i ako nema dodira između faza ( $\lambda_s/\lambda_a \approx 0$ ), vrijedi: [10]

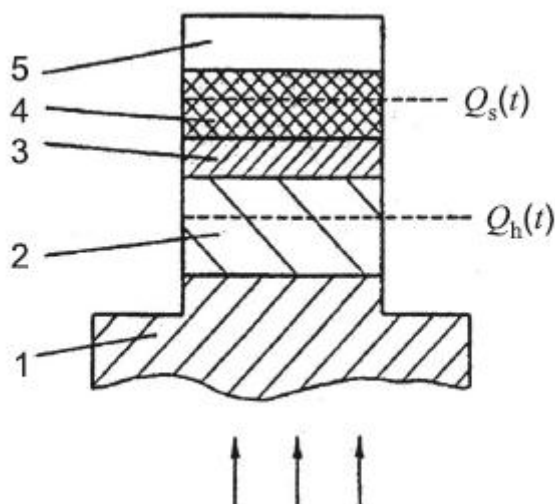
$$\lambda_{\text{eff}(2)} = \lambda_a \left[ 1 + \Pi (1 - \Pi^{1/3}) \right] \quad 5.8.$$

Zbog nekih nedosljednosti u rezultatima smatra se kako efektivni koeficijent toplinske vodljivosti iznosi [6] :

$$\lambda_{\text{eff}} = a\lambda_{\text{eff}(1)} + b\lambda_{\text{eff}(2)} \quad 5.9.$$

gdje je  $a + b = 1$ , a i b su vrijednosti koje ovise o veličini i obliku ćelije.

Slika 5.1. pokazuje način mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti. Uzorak koji je označen brojem 4, ploča 3 i stap 5 grijani su toplinskim tokom. Bočne površine uzorka, stapa i ploča 2 i 3 adijabatski su izolirani. Stap 5 i ploča 3 napravljeni su od bakra koji ima velik koeficijent toplinske vodljivosti tako da je pad temperature u njima malen.



Slika 5.1. Način mjerenja koeficijenta toplinske vodljivosti [6]

Dimenzije su odabrane tako da je apsorbirana toplina u pločama i uzorku 5 do 10 puta manja nego u stapu. Uređaj za mjerenje sastoji se od dva bloka od kojih prvi dovodi energiju i zagrijava sustav brzinom 0,1 K/s i automatski kontrolira temperaturu. Blok za mjerenje se sastoji od ćelija za grijanje, uređaja za mjerenje, uzorka, Chromel-Alumel termoparova i kućišta. Temperaturna razlika između uzorka i ploča za mjerenje koristi se za izračunavanje koeficijenta toplinske vodljivosti. Rezultati se mijenjaju s povišenjem temperature s 25 °C na 75 °C i kreću se u rasponu vrijednosti od 2,1 do 8,2 W/mK.

Nakon mjerenja utvrđen je izraz za izračunavanje koeficijenta toplinske vodljivosti aluminijskih pjena [6] :

$$\lambda_{\text{eff}} = 0,13 \frac{\lambda_s}{1 - \Pi \left( 1 - \frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right)} + 0,87 \frac{\lambda_a}{1 + \Pi \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_a} - 1 \right)} \quad 5.10.$$

Iz svega je vidljivo kako su aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama dobri toplinski izolatori.

## 5.2. Prijenos topline

Pri korištenju metalnih pjena kao dijelova uređaja kombiniraju se dva načina prijenosa topline: provođenje i zračenje. Teži se da koeficijent prijelaza topline bude što veći kako bi se veća količina topline predala radnom fluidu. Na prijenos topline utječe niz faktora kao što su:

oblik ćelija, relativna gustoća, koeficijent toplinske vodljivosti, emisivnost itd. Koeficijent prijelaza topline se izračunava [6] :

$$\alpha_c = \frac{2\rho/\rho_s}{d} \lambda_{\text{eff}} \sqrt{\text{Bi}_{\text{eff}}} \tan h \left( \frac{2b}{d} \sqrt{\text{Bi}_{\text{eff}}} \right) \quad 5.11.$$

gdje je:  $d$  – debljina stijenke ćelija,  $b$  – debljina medija kojim se prenosi toplina,  $\text{Bi}_{\text{eff}}$  – efektivni Biotov broj.

Empirijski je utvrđeno da su:[6]

$$\lambda_{\text{eff}} = 0,28\lambda_s \quad 5.12.$$

$$\text{Bi} = \frac{\alpha_l}{d\lambda_s} \quad 5.13.$$

$$\text{Bi} = 0,91 \text{Pr}^{0,36} \text{Re}^{0,4} (\lambda_a/\lambda_s) \quad \text{za} \quad \text{Re} \leq 40 \quad 5.14.$$

$$\text{Bi} = 0,62 \text{Pr}^{0,36} \text{Re}^{0,4} (\lambda_a/\lambda_s) \quad \text{za} \quad \text{Re} > 40 \quad 5.15.$$

$$\text{Re} = \frac{v_f d}{\nu_a} \quad 5.16.$$

$$\text{Bi}_{\text{eff}} = 1,2\text{Bi} \quad 5.17.$$

gdje je:  $Re$  – Reynoldsov broj,  $Pr$  – Prandtlov broj,  $v_f$  – brzina fluida  $\alpha$  – koeficijent kinematičke viskoznosti,  $\lambda_s$  – koeficijent toplinske vodljivosti materijala pjene,  $\lambda_a$  – koeficijent toplinske vodljivosti fluida,  $\alpha_l$  – lokalni koeficijent prijelaza topline.

Svi ovi izrazi koriste se za izračunavanje količine topline koja je predana fluidu kroz ćelijaste materijale. Vrijednosti količine topline i parametara od kojih ona ovisi dane su sljedećim relacijama [6] :

$$Q = L \alpha_c \Delta T_{lm} \quad 5.18.$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_e - T_0}{\ln[(T_1 - T_0)/(T_1 - T_e)]} \quad 5.19.$$

$$\Delta T_{lm} = T_1 - T_0 \quad 5.20$$

$$T_f = T_1 - (T_1 - T_0) \exp(-x/l) \quad 5.21.$$

$$l = \frac{\rho_a C_p b v_f}{2 \eta \lambda_{eff} \sqrt{Bi_{eff}}} \left( 1 + \frac{\rho/\rho_s}{1,5 \eta} \tan h \frac{2b}{d} \sqrt{Bi_{eff}} \right)^{-1} \quad 5.22.$$

gdje je:  $Q$  – količina topline,  $L$  – duljina sloja pjene,  $\Delta T_{lm}$  – logaritamska srednja temperatura,  $T_1$  – temperatura izvora topline,  $T_0$  – temperatura na ulazu,  $T_e$  – temperatura na izlazu,  $T_f$  pokazuje kako se mijenja temperatura fluida duž osi  $x$ ,  $l$  – duljina prijenosa,  $C_p$  – specifični toplinski kapacitet, faktor  $\eta = 1 - 0,22 \cdot (\rho/\rho_s)$ .

Aluminijske pjene otporne su na temperature i do 780 °C na kojima se deformiraju tek ako su izložene većim mehaničkim opterećenjima.

### 5.3. Vatrootpornost

Zahvaljujući  $Al_2O_3$  aluminijske pjene sa zatvorenim ćelijama su prilikom ispitivanja pokazale jako dobru vatrootpornost. Kada uzorak gubi izolacijski kapacitet dolazi do toplinskog stradavanja, a do strukturnog stradavanja kada gubi nosivost. Pri ispitivanju se uzorak u obliku ploče debljine  $L$  izlaže vrlo vrućim plinovima koji simuliraju vatru. Smatra se



kako se izloženim dijelovima uzorka temperatura vrlo naglo povećava sa  $T_0$  (temperatura okoliša) na  $T_F$  (temperatura plamena). Dio topline odlazi u uzorak, a dio se gubi u okolinu. Vatrootpornost se prikazuje sljedećom diferencijalnom jednačbom [6] :

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\delta T}{\delta t} \quad 5.22.$$

gdje je:  $T$  – temperatura,  $\kappa$  – toplinska difuznost,  $t$  – vrijeme.

Toplinska vatrootpornost  $\tau$  definirana je kao vrijeme nakon kojeg dolazi do stradavanja materijala zbog prevelikog prijenosa topline. Materijal gubi izolacijski kapacitet. Može se reći da do stradanja materijala dolazi kada temperatura neizložene površine  $T_B$  dostigne kritičnu temperaturu  $T_C$  (npr. talište).

Toplinska vatrootpornost prikazuje se tada sljedećim relacijama [6]:

$$\tau = \frac{L^2}{\kappa} \left[ \frac{1}{10} - \phi(Bi) \ln \left( 1 - \frac{T_C - T_0}{T_B^\infty - T_0} \right) \right] \quad 5.23.$$

$$T_B^\infty = T_0 + \frac{T_F - T_0}{1 + Bi} \quad 5.24$$

gdje je:

$Bi$  – Biotov broj,  $T_B$  – temperatura neizložene površine,  $T_C$  – kritična temperatura (talište)

$T_B^\infty$  – temperatura neizložene površine u mirnom stanju.

Vatrootpornost jako raste s porastom Biotovog broja koji se za ploče može izračunati iz izraza:

$$Bi = \alpha_c d / \lambda \quad 5.25.$$

gdje je:  $\alpha_c$  - koeficijent prijelaza topline,  $d$  – debljina ploče a  $\lambda$  - koeficijent toplinske vodljivosti ploče.

Strukturna vatrootpornost  $\tau^*$  definira se kao vrijeme nakon kojeg dolazi do stradavanja materijala kada on, zbog utjecaja vatre, gubi mehanička svojstva. Za aluminijske legure, kada se kritična temperatura približi talištu, može se reći da je  $\tau^* = \tau$ . Kod aluminijskih pjena sve se to drastično mijenja. One imaju mnogo veću strukturnu vatrootpornost što se pripisuje niskom koeficijentu toplinske vodljivosti i tankom sloju  $Al_2O_3$  koji prekriva stijenke ćelija. Zbog svega toga pjene mogu biti izložene i temperaturama višim od tališta. ALPORAS pjene su ispitane prema njemačkim standardima i proglašene negorivim. Mogu biti izložene temperaturama višim od 600 °C, za razliku od poliuretanskih pjena koje se koriste u tračnim vozilima, koje se izobličie i razvijaju otrovne plinove.

## 6.EKSPERIMENTALNI DIO

Metalne pjene predstavljaju noviji oblik metalnih materijala, čija sva svojstva nisu još utvrđena, što utječe na njihovu nedovoljnu zastupljenost u inženjerskoj primjeni.

Cilj diplomskog rada bio je istražiti ponašanje uzoraka okruglog profila, jednakog volumena i poroznosti, napravljenih od aluminijske pjene AlSi10 sa zatvorenim ćelijama, tijekom zagrijavanja na različite temperature (450, 300 i 140°C) odnosno hlađenja te rezultate usporediti sa rezultatima ispitivanja aluminijske žica približno istog kemijskog sastava AlSi5.

AlSi10 i AlSi5 aluminijske legure u svom kemijskom sastavu nemaju magnezija stoga se na njima mogu provoditi toplinska ispitivanja bez pojave precipitacijskog očvrnuća.

Ispitivanje ponašanja aluminijskih pjena i žica tijekom zagrijavanja i hlađenja provedeno je na dilatometru A.D.A.M.E.L. DP55 Zavoda za materijale FSB-a. Za ispitivanje je potrebno napraviti uzorke promjera 3,5 mm i duljine 50 mm. Kako bi se izradili uzorci aluminijskih pjena zadanih mjera bilo je potrebno izraditi kalup za njihovu proizvodnju.

Kalup u kojem je moguće istovremeno napraviti tri uzorka napravljen je u Laboratoriju za alatne strojeve FSB-a. U Laboratoriju za nemetale FSB-a izrađeno je osamnaest uzoraka aluminijskih pjena jednakih dimenzija, sastava i poroznosti. Svi uzorci su imali poroznost 50%.

Uzorci se ispituju jedan po jedan, a trajanje ispitivanja jednog uzorka traje pet do šest sati. Ispitivanja su provedena na temperaturama 450, 300 i 140°C. Na svakoj temperaturi ispitano je šest uzoraka aluminijskih pjena. Promjene duljine uzoraka pratile su se na dijagramu temperatura-dilatacija u programu LABview.

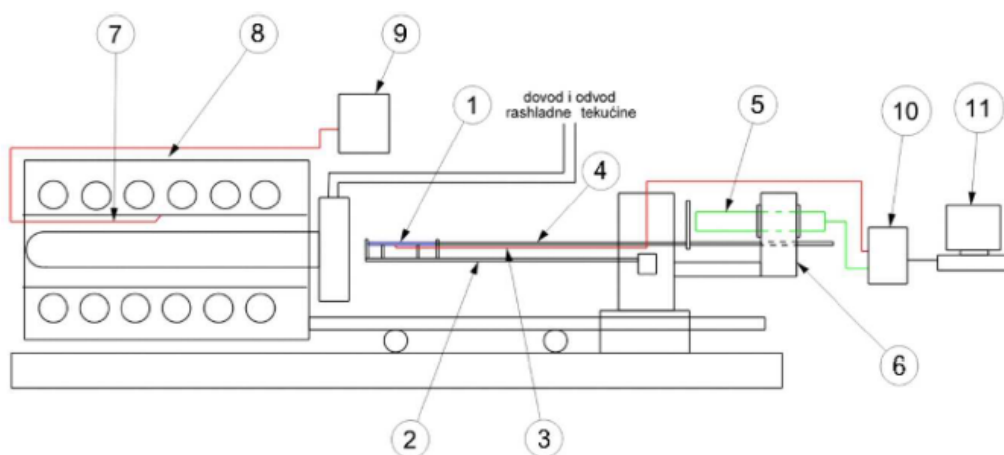
Radi usporedbe svojstava metalnih pjena i materijala bez poroznosti na dilatometru je ispitano ponašanje triju aluminijskih žica sa sličnim sastavom AlSi5. Jedna žica je zagrijavana na 450°C, druga na 300°C, a treća na 140°C. Iznosi koeficijenata dilatacije su prikazani tablično radi lakše usporedbe.

Kako bi se sa sigurnošću utvrdile strukturne promjene u aluminijskim žicama ili nepostojanje istih na uzorcima od žice su ispitane tvrdoće na tvrdomjeru Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava FSB-a.

### 6.1. Dilatometar

Dilatometrijsko ispitivanje provedeno je na Zavodu za toplinsku obradu FSB-a na dilatometru A.D.A.M.E.L. DP55. U izvornoj izvedbi ovaj uređaj može se koristiti za snimanje apsolutne i diferencijalne krivulje dilatacije pomoću optičkog sustava koji na ekran projicira svijetle točkice. Relativna pozicija točkica na ekranu odgovara promjeni dimenzija ispitnih uzoraka. Samo snimanje se odvija tako da mjeritelj u određenim trenucima na graf bilježi promjenu dimenzije uzorka i temperaturu pri kojoj očitava dilataciju.

Shematski prikaz moderniziranog dilatometra prikazan je na slici 6.1, a na slici 6.2. je fotografija cijelog uređaja.



Slika 6.1. Dijelovi dilatometra

Popis dijelova: 1-uzorak, 2-nosač uzorka, 3-termoelement uzorka, 4-potisni štap, 5-indukcijski mjerište pomaka, 6-nosač mjerište pomaka, 7-regulacijski termoelement peći, 8-peć 9-upravljačka konzola, 10-akvizicijska kartica, 11-računalo.



Slika 6.2.Dilatometar u radu

Prije svakog mjerenja induktivni senzori su "nulirani" u području u kojem imaju najmanju grešku i korištena je vodom hlađena toplinska barijera između senzora i peći. Te mjere su poduzete kako bi se povećala točnost i ponovljivost mjerenja. Zbog istog razloga paralelno sa mjerenjem dilatacije uzorka mjerena je i dilatacija etalona izrađenog od materijala naziva PYROS (82% Ni, 7% Cr, 5% W, 3% Fe, 3% Mn). Svojstvo ovog materijala je da se ugrijavanjem linearno rasteže. To znači da se preko vrijednosti dilatacije etalona može izvršiti korekcija temperature mjerene preko termoelementa. Potreba za tom korekcijom proizlazi iz manjeg promjera termoelementa ( $\varnothing$  1,5mm) u odnosu na promjer uzorka ( $\varnothing$  3,5mm), zbog čega treba pretpostaviti da će se oni grijati i hladiti različitim dinamikama. Za etalon istog promjera kao ispitivani uzorak postoje precizni tablični podatci iz kojih je regresijskom analizom izvedena formula pomoću koje se iz dilatacije etalona može odrediti temperatura koja vjernije odgovara temperaturama etalona i samoga uzorka.

Kada se govori o „toplinskoj dilataciji“ misli se na ponašanje materijala prilikom ugrijavanja (ohlađivanja). Poznato je, da se većina materijala rasteže prilikom ugrijavanja i obrnuto steže prilikom hlađenja.

Koeficijent toplinske dilatacije predstavlja dilataciju (kontrakciju) materijala u temperaturnom intervalu od 1 K u odnosu na početnu dužinu.

Za određeni temperaturni interval koeficijent toplinske dilatacije izračunava se prema sljedećem izrazu [5]:

$$\beta_{\vartheta_0-\vartheta} = \frac{\delta_{\vartheta} - \delta_{\vartheta_0}}{(\vartheta - \vartheta_0) \cdot l_0}, \text{ K}^{-1}$$

6.1

Pri čemu znače:

$\delta_{\vartheta}$ , mm – apsolutna dilatacija uzorka kod temperature  $\vartheta$

$\delta_{\vartheta_0}$ , mm – apsolutna dilatacija uzorka kod temperature 0

$\vartheta$ , °C – gornja temperatura promatranog temperaturnog intervala

$\vartheta_0$ , °C – donja temperatura promatranog temperaturnog intervala

$l_0$ , mm – početna duljina uzorka (50 mm)

## 6.2. Izrada kalupa

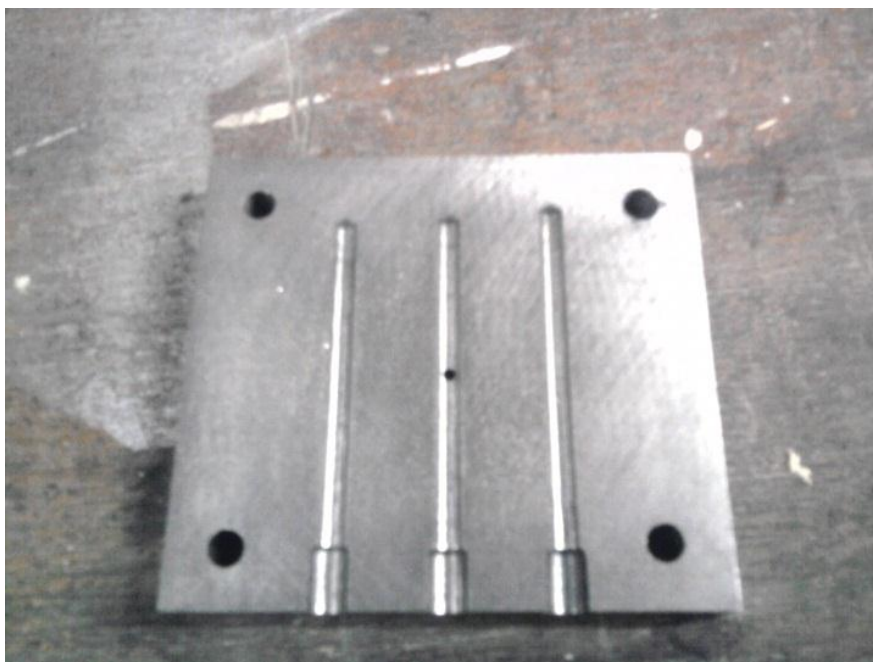
Kao što je već spomenuto za izradu uzoraka bilo je potrebno izraditi odgovarajući kalup. Od čeličnog škarta izrađen je dvodijelni kalup koji se sastoji od dvije identične čelične ploče dimenzija 72x80 mm i debljine 10 mm.

Materijal kalupa je St 37-2 prema DIN normi ili Č.0361 prema HRN normi, kalup je izrađen u Laboratoriju za alatne strojeve FSB-a, a uzorci za testiranje izraditi će se u Laboratoriju za nemetale FSB-a. Na slici 6.3. nalazi se kalup spreman za stavljanje u peć, a na slici 6.4. prikazana je samo jedna ploča kalupa, odnosno samo gornji dio.



Slika 6.3. Kalup

U kalupu se nalaze tri provrta dimenzija koje odgovaraju dimenzijama uzoraka koji će se izraditi Ø 3,5x50 mm.



Slika 6.4. Gornji dio kalupa

Kalup je prije stavljanja u peć potrebno pripremiti.

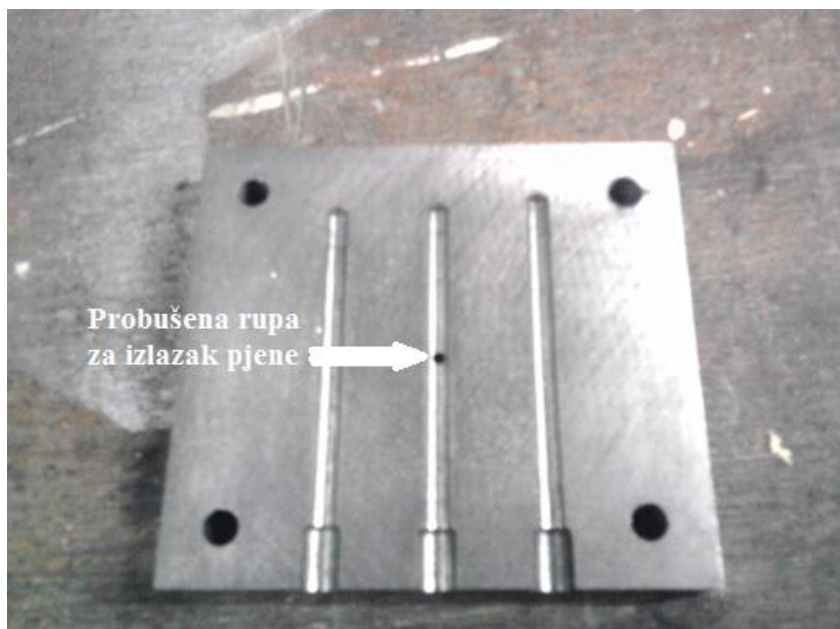


### 6.3. Priprema kalupa

Najprije se na gornjem dijelu kalupa probuši rupa koja omogućuje pojavljivanje kapljice metalne pjene koja pokazuje da je izradak spreman za hlađenje. (Slike 6.5. i 6.6.)



Slika 6.5. Bušenje rupe u kalupu koja omogućuje izlazak pjene u kalupa



Slika 6.6. Probušena rupa u kalupu za izlazak pjene



Kalup je prije stavljanja u peć očišćen benzinom da bi se uklonile nečistoće nastale tokom strojne obrade. (Slika 6.7.) Nečistoće uzrokuju nepravilan oblik izratka i trošenje navoja vijaka kojim se pričvršćuju ploče kalupa.



Slika 6.7. Čišćenje kalupa u benzinu

Nakon uklanjanja nečistoća benzinom kalup je propuhan zrakom iz kompresora da se očisti benzin sa površine što je prikazano na slici 6.8.



Slika 6.8. Propuhivanje kalupa zrakom iz kompresora

Na površinu kalupa nanosi se pomoću kompresora sloj keramike zbog lakšeg odvajanja gotovih uzoraka od površine kalupa nakon završetka upjenjavanja. (Slike 6.9. i 6.10.)



Slika 6.9. Nanošenje keramike na unutrašnju površinu kalupa



Slika 6.10. Keramika na kalupu

Nakon što je kalup pripremljen za uporabu započinje se sa samom izradom uzoraka.

#### 6.4. Izrada uzoraka aluminijskih pjena

Kao što je u uvodu spomenuto izraditi će se osamnaest uzoraka aluminijskih pjena dimenzija  $\varnothing$  3,5x50 mm. Svi uzorci će biti izrađeni sa jednakom poroznošću - 50%. Za izradu uzoraka upotrijebiti će se prekursor oznake ALULIGHT AlSi10 TiH2 - 0,8 koji je prikazan na slici 6.11.



Slika 6.11. Prekursor

Volumen uzorka traženih dimenzija bez poroznosti računati će se prema:

$$V = r^2 \pi d \quad 6.2.$$

Pri čemu je  $r=2\text{mm}$ ,  $d=50\text{mm}$  što znači da je volumen jednog uzorka traženih dimenzija bez poroznosti jednak:

$$V = 628 \text{ mm}^3 = 0,628 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Gustoća lijevanog aluminija AlSi10 iznosi  $\rho = 2550 \text{ kg/m}^3$ . Formula iz koje se računa masa uz poznatu gustoću i volumen glasi:

$$m = \rho V \quad 6.3.$$

Uz poznati volumen i gustoću masa uzorka bez poroznosti jednaka je

$$m=1,6 \text{ g}$$

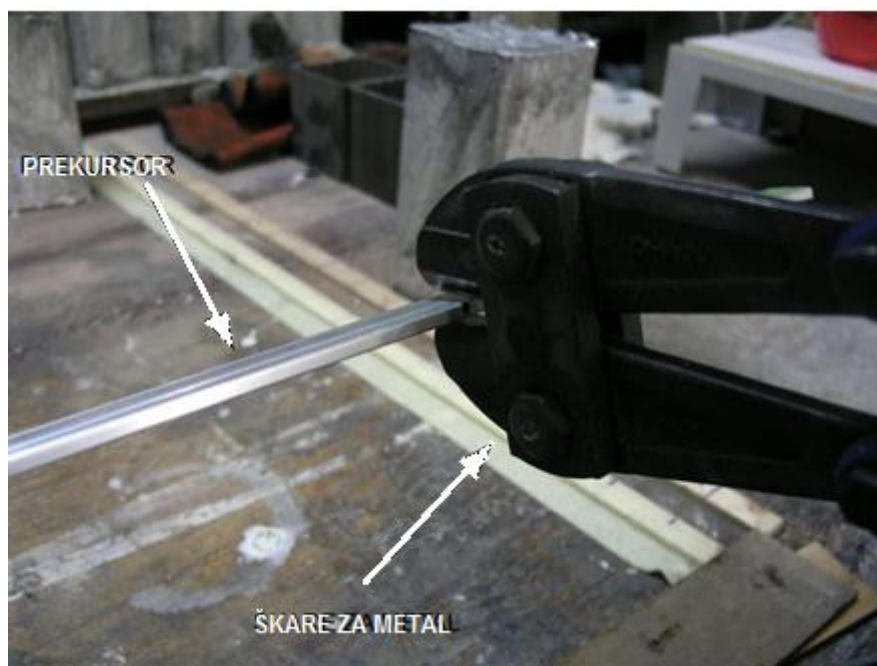
Masa uzorka traženih dimenzija Ø 3,5x50 mm sa 50% poroznosti iznositi će:

$$m= 1,6 \times 0,5 = 0,8 \text{ g}$$



Veličina i oblik prekursora ne odgovara dimenzijama provrta u koji treba biti položen u kalupu pa se pristupa usitnjavanju i oblikovanju prekursora po mjeri kalupa.

Škarama je prekursor usitnjavan, a čekićem oblikovan da stane u kalup što se vidi na slici 6.12.



Slika 6.12. Usitnjavanje prekursora sa škarama

Za dobivanje uzorka poroznosti 50% kao što je već proračunato bilo je potrebno u kalup staviti 0,8 g usitnjenog prekursora. Na slici 6.13. prikazan je prekursor na vagi koji se stavlja u kalup.



Slika 6.13. Prekursor na vagi

Nakon što je usitnjen i izvagan prekursor je postavljan u kalup što se vidi na slici 6.14..



Slika 6.14. Postavljanje dijelova prekursora u kalup

Nakon postavljanja prekursora i zatvaranja kalupa pristupalo se upjenjavanju uzoraka.

Tehnologija korištena za izradu uzoraka je plinom oslobođene čestice rastvorene u polučvrstoj fazi. Upotrebljena je elektrootporna peč koja se nalazi u Laboratoriju za nemetale FSB-a prikazana na slici 6.15.



Tip: Zvonasta peč sa zračnom atmosferom- ZPZ.

#### TEHNIČKE KARAKTERISTIKE:

- Korisni prostor: 400 x 400 x 400 mm,
- Vanjske mjere: 1,2 x 1,2 x 2,7 m,
- Maksimalna temperatura: 1000 °C,
- Toplinska izolacija: Lake izolacijske ploče i keramička vlakna,
- Snaga: 7,5 kW,
- Napon: 3x380/220 V,
- Kontrola temperature: Mantel-termoelement tip Ni-NiCr preuzet zajedno s postojećim upravljačkim ormarom,
- Reguliranje temperature: Digitalni programator SHIMADEN, ugrađen u postojeći upravljački ormar,
- Zaštita grijača: Digitalni ON/OFF regulator SHIMADEN, ugrađen u postojeći upravljački ormar.

#### NAMIJENA PEČI:

Zagrijavanje metalnih kalupa za ekspanziranje metalnih pjena od lakih metala do temperature 1000 °C.

#### TEHNIČKI OPIS:

U nosivoj četverostranoj dvostrukoj oplati peći od čeličnih profila postavljena je toplinska izolacija od vatrootpornih keramičkih materijala i instalirani elektrootporni spiralni grijači na keramičkim cjevnim nosačima, koji pomoću termoelementa/manteltermoelementa i PID programatora/regulatora automatski upravljaju postavljenim procesom zagrijavanja. Pomoću pneumatske naprave za vertikalno otvaranje peći s protu-utegom omogućava se šaržiranje i dešaržiranje metalnih kalupa.

Slika 6.15. Elektrootporna peč

Kalup se grijao u peći na temperaturu 780 °C. Vrijeme upjenjavanja predstavlja problem jer ne postoji matematički model po kojem bi se izračunalo. Za svaki kalup i svaki materijal to vrijeme je potrebno odrediti ispitivanjem. U ovom slučaju radilo se o desetak minuta. Izradak je gotov kada se na gornjem dijelu kalupa, koji na sebi ima otvor za izlaz plinova, pojavi prva kapljica taljevine prikazana na slici 6.16. Nakon čega se kalup vadi iz peći i hladi na zraku te se iz njega vade uzorci. Kalup u peći prikazan je na slici 6.17., a na slici 6.18. prikazan je užareni kalup.



Slika 6.16. Ohlađeni kalup i kapljica pjene na površini kalupa prema kojoj se zna da je pjena gotova



Slika 6.17. Kalup u peći





Slika 6.18.. Užareni kalup nakon vađenja iz peći

Uzorci su nakon vađenja iz peći brušeni kako bi se dobila što ravnija površina radi lakšeg i sigurnijeg ispitivanja na dilatometru.

Kao što je već napomenuto kako bi se usporedilo ponašanje aluminijskih pjena AlSi10 tijekom zagrijavanja i hlađenja sa aluminijem bez poroznosti bilo je potrebno izraditi uzorke aluminijske žice sastava AlSi5.

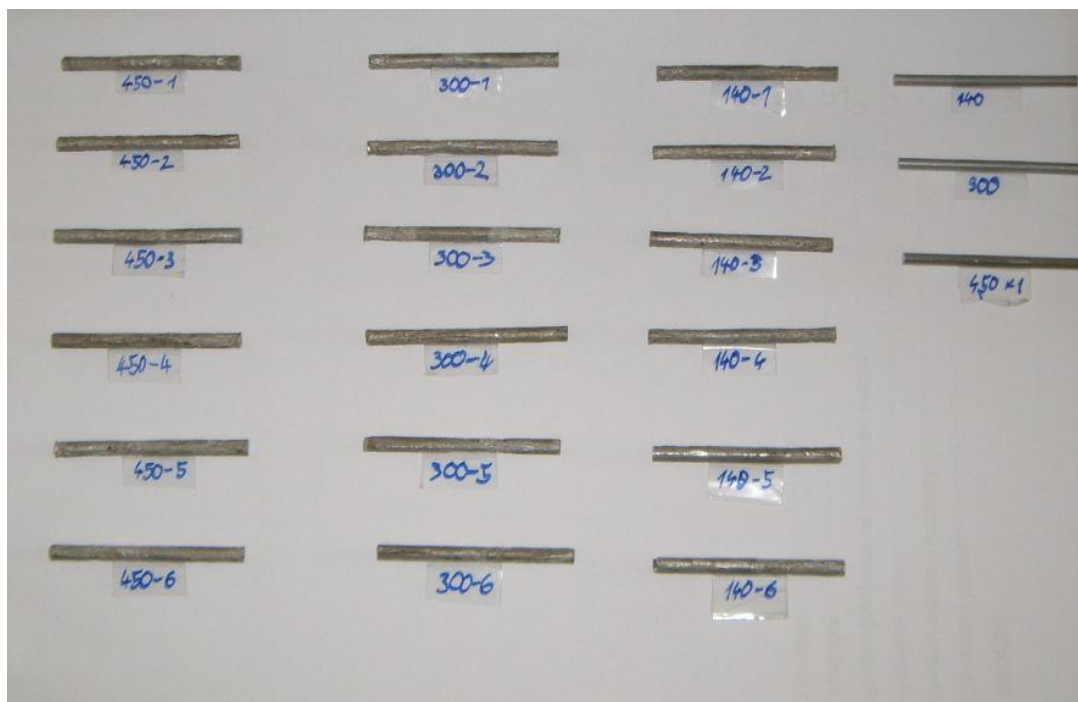
### **6.5. Izrada uzoraka od aluminijske žice**

Od kupovne žice su odrezana tri uzorka okruglog presjeka dimenzija 3,5x50 mm. Krajevi su pobrušeni radi bolje dosljednosti u dilatometar što se vidi na slici 6.19.



6.19. Brušenje ruba aluminijske žice

Slika 6.20. prikazuje ispitne uzorke sa oznakama temperatura na kojima će se ispitivati dok su u tablici 6.1. prikazane duljine i oznake koje će se koristiti u daljnjem tekstu.

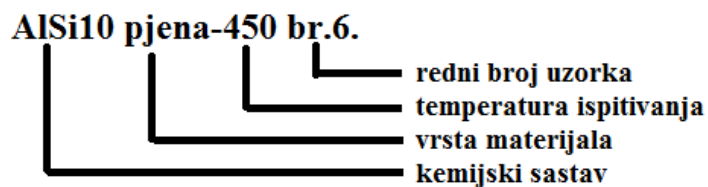


Slika 6.20. Ispitni uzorci

Tablica 6.1. Oznake i duljine izrađenih uzoraka

Materijal	br.	Temperatura, °C	duljina $l_0$ (mm)
<b>AlSi5 žica-140</b>	1	140	50,51
<b>AlSi10 pjena-140</b>	1	140	48,61
	2	140	48,52
	3	140	48,23
	4	140	48,99
	5	140	48,85
	6	140	49,30
<b>AlSi5 žica-300</b>	1	300	50,40
<b>AlSi10 pjena-300</b>	1	300	50,56
	2	300	50,47
	3	300	51,50
	4	300	52,45
	5	300	50,98
	6	300	50,56
<b>AlSi5 žica-450</b>	1	450	50,14
<b>AlSi10 pjena-450</b>	1	450	48,66
	2	450	49,43
	3	450	50,34
	4	450	50,11
	5	450	50,95
	6	450	50,98

Prva četiri slova i broj označavaju kemijski sastav uzorka. Daljnja oznaka pokazuje da li se radi o pjenu ili žici te zadnji broj označava temperaturu i na kraju su označeni brojevi od jedan do šest. Npr. AlSi10 pjena-300 br. 6.; riječ je o pjenu broj šest sastava AlSi10 koja će biti grijana na temperaturi 300 °C.



Slika 6.21. Primjer oznake uzorka

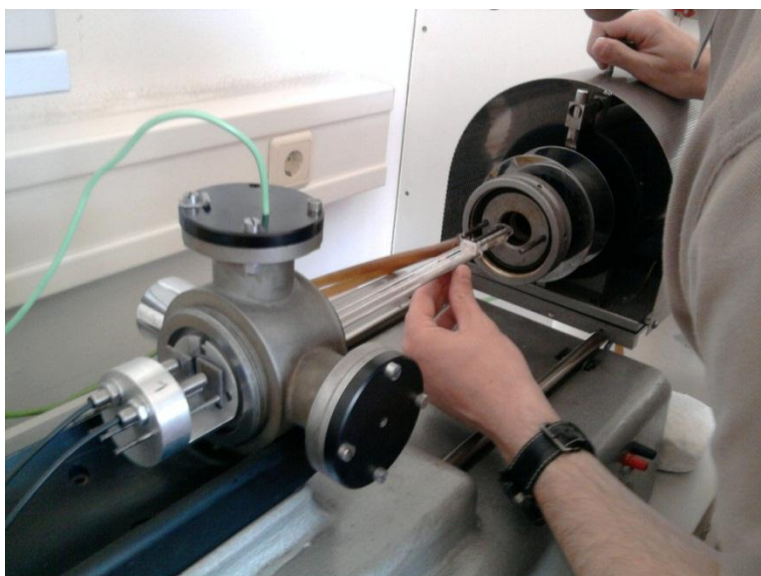
Nakon izrade uzoraka pristupilo se ispitivanju na dilatometru.

## 6.6. Ispitivanja uzoraka na dilatometru

Uzorci su ispitani na dilatometru A.D.A.M.E.L. DP55 na temperaturama 450, 300 i 140°C. Na svakoj temperaturi ispitano je šest uzoraka aluminijskih pjena i jedan uzorak aluminijske žice.

Između uzorka i senzora postavila se mala pločica od nehrđajućeg austenitnog čelika debljine 0,57 mm kako bi se spriječilo prodiranje senzora u uzorak i pravljenje šupljina što bi značajno poremetilo rezultate ispitivanja.

Na slikama 6.21. i 6.22. prikazano je postavljanje uzorka u dilatometar i uzorak u dilatometru spreman za ispitivanje.



Slika 6.22. Postavljanje uzorka u dilatometar



Slika 6.23. Uzorak u dilatometru

Nakon što su postavljeni uzorci u dilatometar i induktivni senzori "nulirani" peć se počinje ugrijavati na temperaturu 450, 350 ili 140°C. Početna temperatura je sobna temperatura, dvadesetak Celzija. Ugrijavanje na željenu temperaturu traje dvadesetak minuta.

Nakon što se temperature peći i uzorka izjednače na željenu temperaturu, na toj temperaturi uzorak se drži dva sata nakon čega slijedi hlađenje vodom koje traje nekoliko sati dok se temperatura uzorka i peći ne vrati na sobnu temperaturu.

Porast temperature i promjena duljine prati se na pokazivaču na peći i na dijagramu u programu LabVIEW u obliku krivulje temperatura-dilatacija.

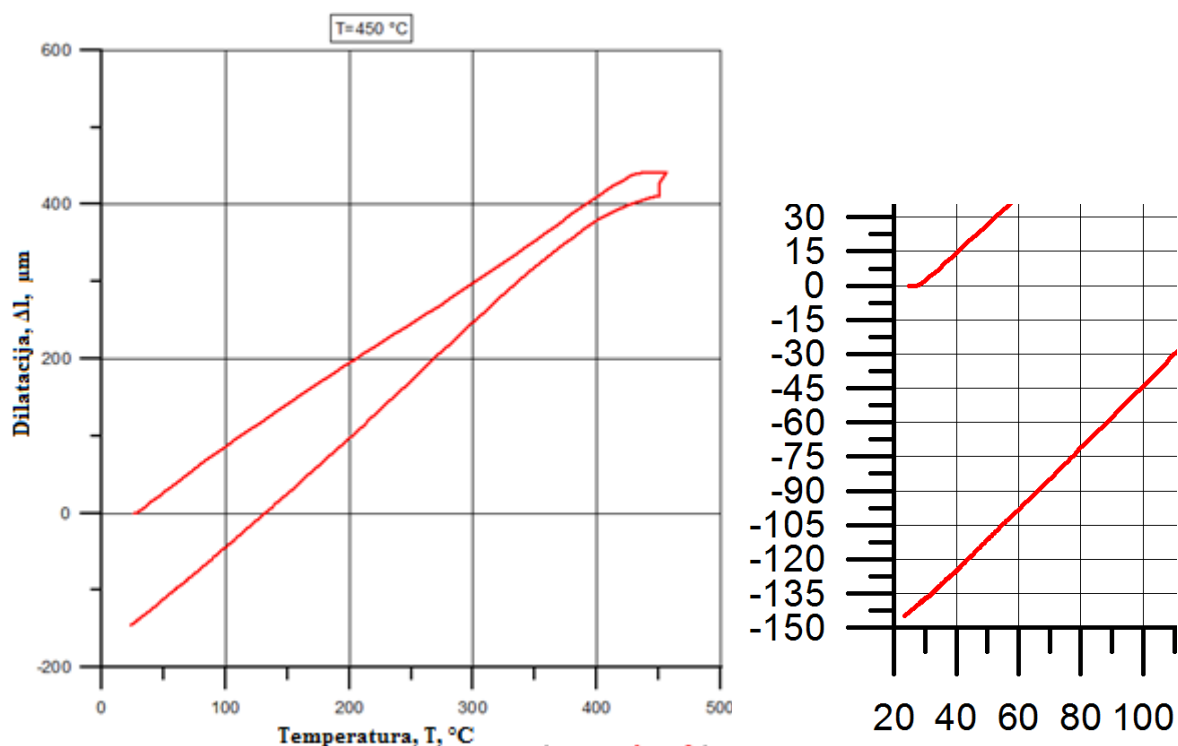
Rezultati ispitivanja su korištenjem programa Grapher 10. prikazani dijagramima.

## 7. Rezultati ispitivanja dilatometrom

### 7.1. Dijagrami

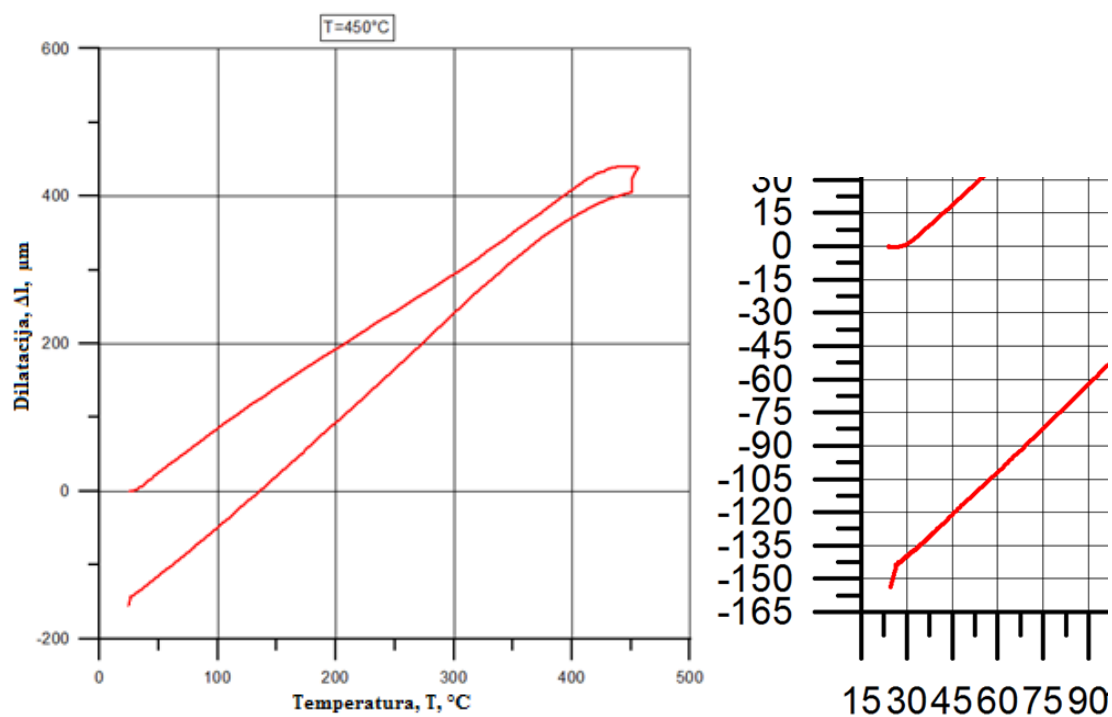
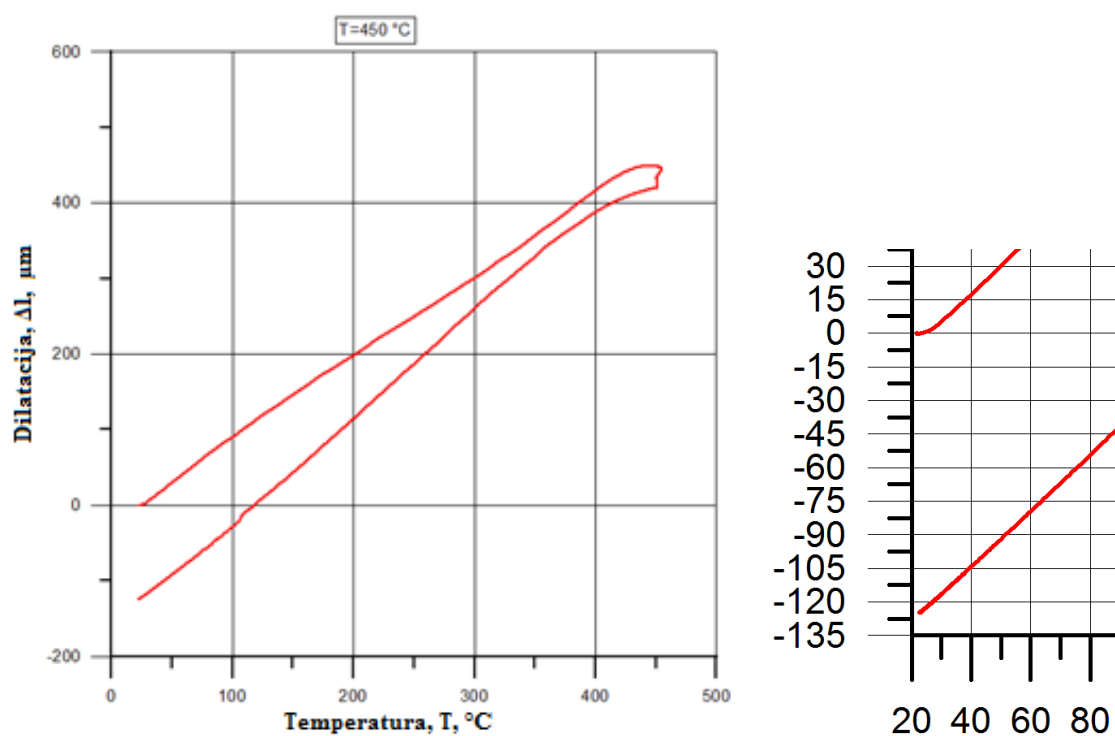
U dijagramima temperatura-dilatacija prikazane su promjene dimenzija uzoraka tijekom zagrijavanja i hlađenja. Dilatacija je izražena u mikrometrima, a temperatura u stupnjevima Celzijima. S desne strane je radi bolje preglednosti i razumijevanja prikazan uvećani detalj početka i završetka krivulja dilatacije.

Prije ispitivanja na dilatometru uzorci AlSi5 žice su žareni na 450°C kako bi se uklonila zaostala naprezanja koja su nastala hladnom deformacijom prilikom izrade žice vučenjem (Slike 7.1., 7.2. i 7.3.)



Slika 7.1. Dilatogram žarenja AlSi5-140 žice na 450 °C



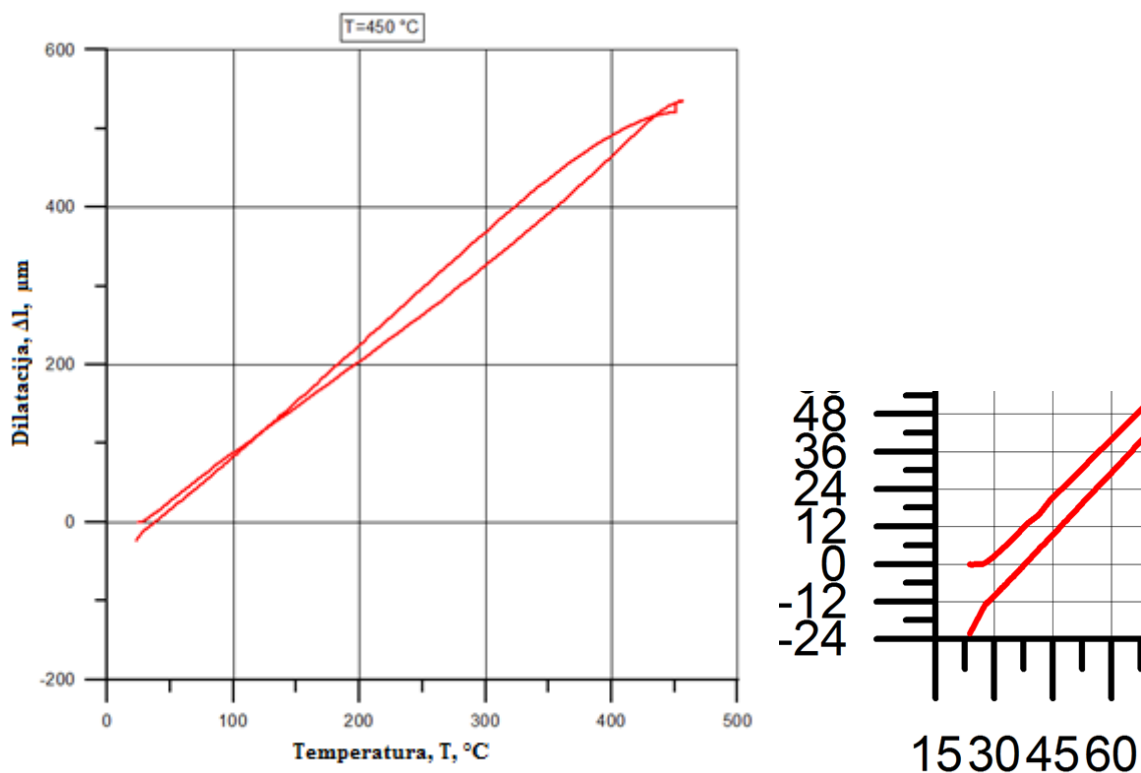
Slika 7.2. Dilatogram žarenja AlSi5 žice-300 na 450  $^{\circ}\text{C}$ Slika 7.3. Dilatogram žarenja AlSi5 žice-450 na 450  $^{\circ}\text{C}$

Dijagrami žarenja 7.1., 7.2. i 7.3. pokazuju smanjenje dimenzija AlSi5 žice za 144, 153 i 125  $\mu\text{m}$ . Stezanja uzoraka dokazuje postojanje zaostalih naprezanja u strukturi AlSi5 žice koja su nastala vučenjem.

Nakon žarenja AlSi5 žica pristupilo se ispitivanju uzoraka. Najprije je ispitana aluminijska žica i šest uzoraka aluminijskih pjena predviđenih za ispitivanje na 450°C.

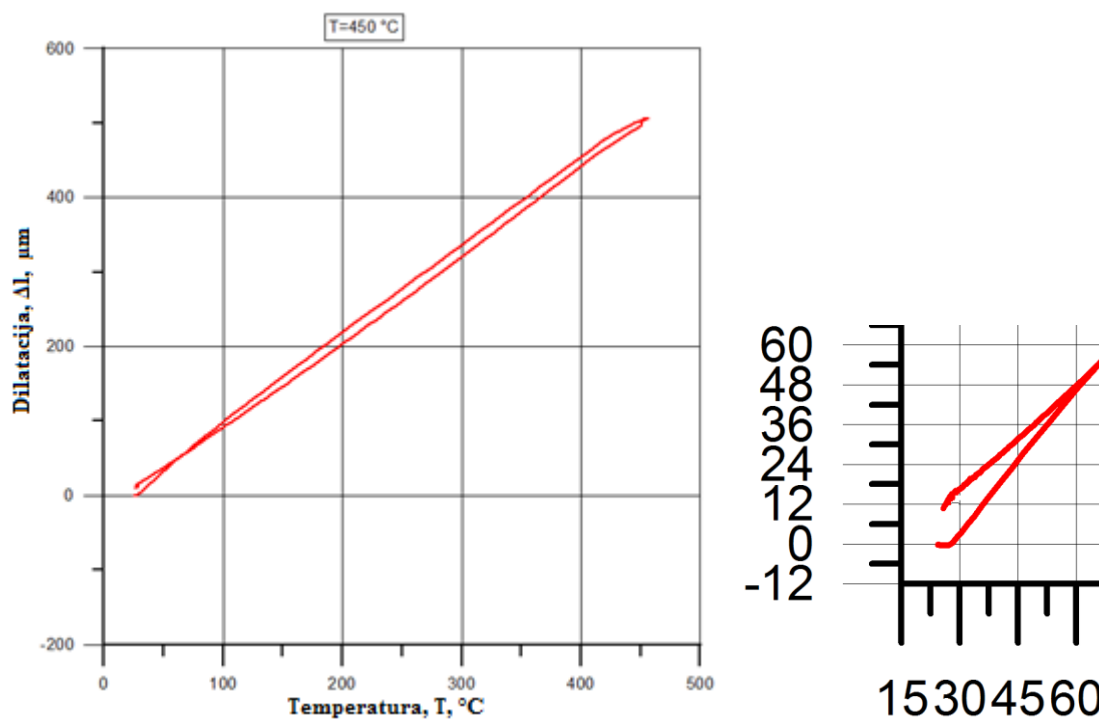
### Uzorci grijani na 450 °C

Slika 7.4 prikazuje promjenu duljine AlSi5 žice-450 (već odžarene) tijekom zagrijavanja i hlađenja dok slike 7.5. do 7.11 prikazuju taj isti proces za uzorke AlSi10 pjena-450 od br.1 do br.6.

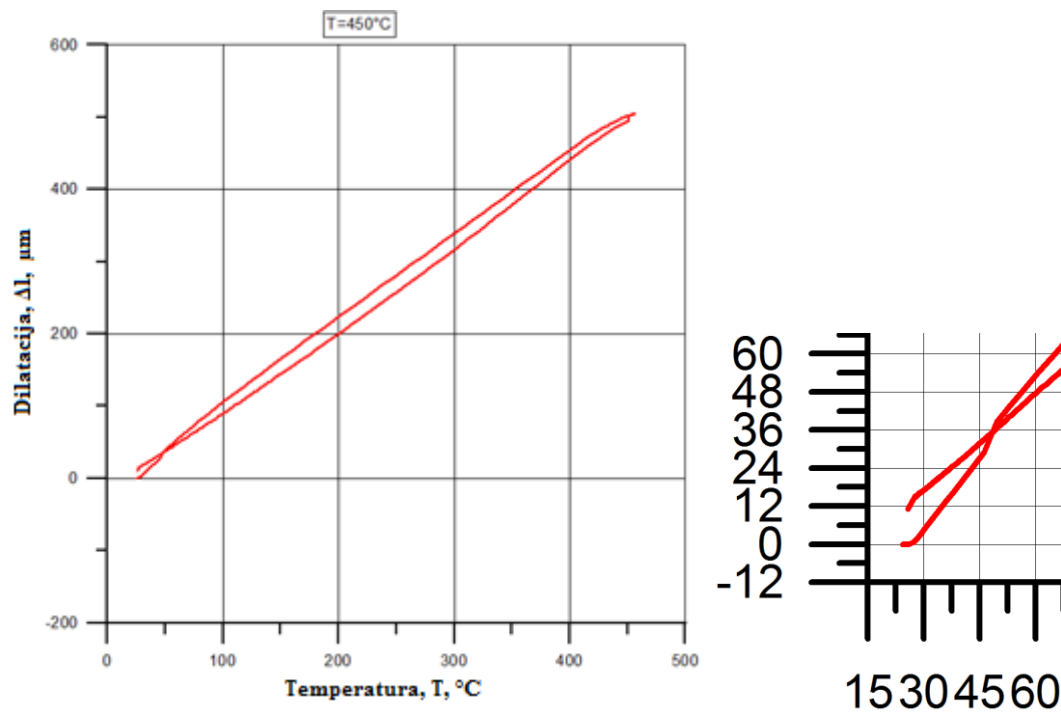


Slika 7.4. Dilatogram AlSi5 žica-450 uzorka tijekom zagrijavanja na temperaturu 450  $^{\circ}\text{C}$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

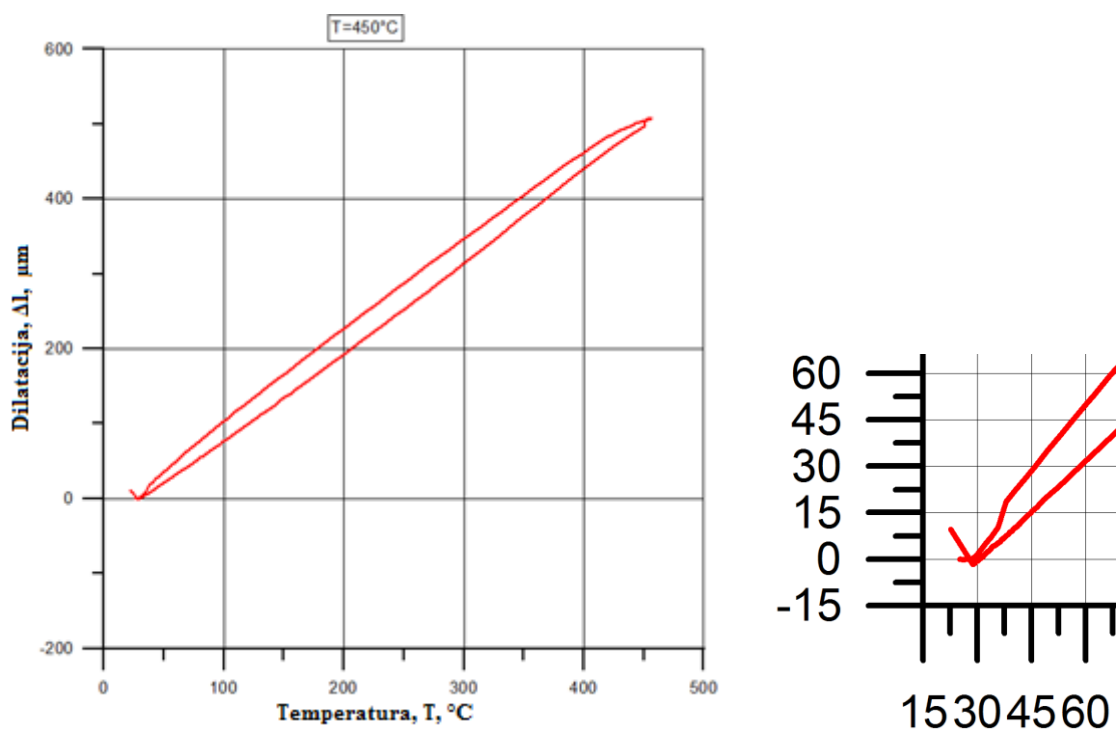




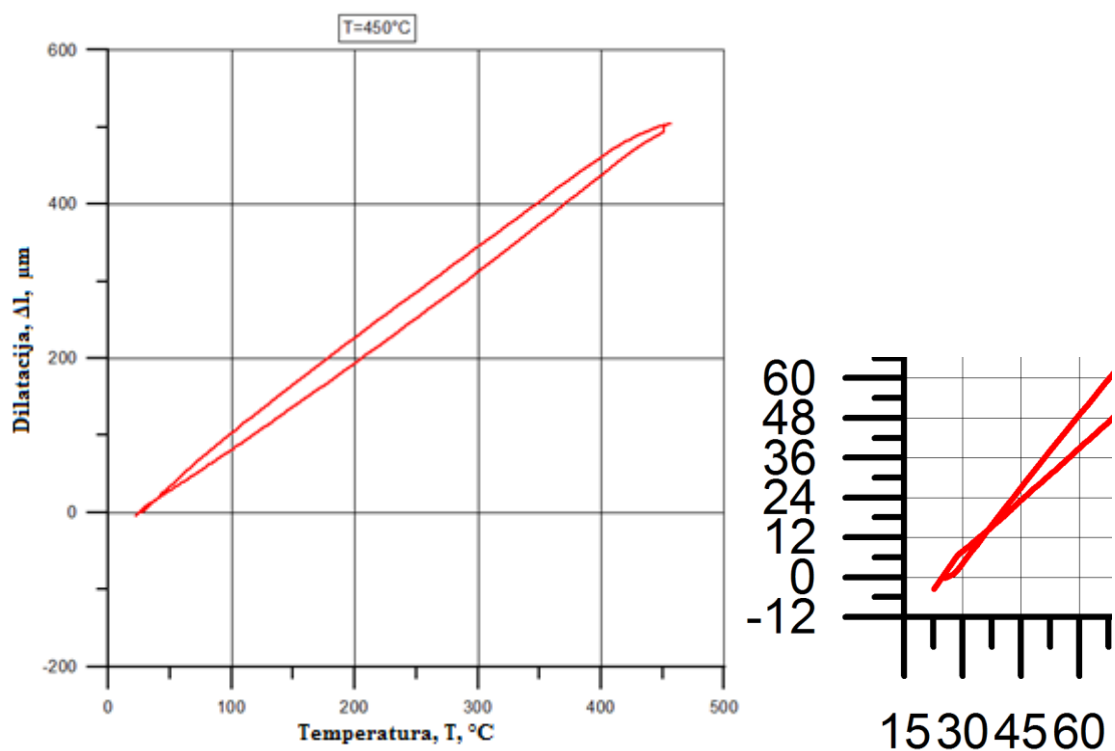
Slika 7.5. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.1 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



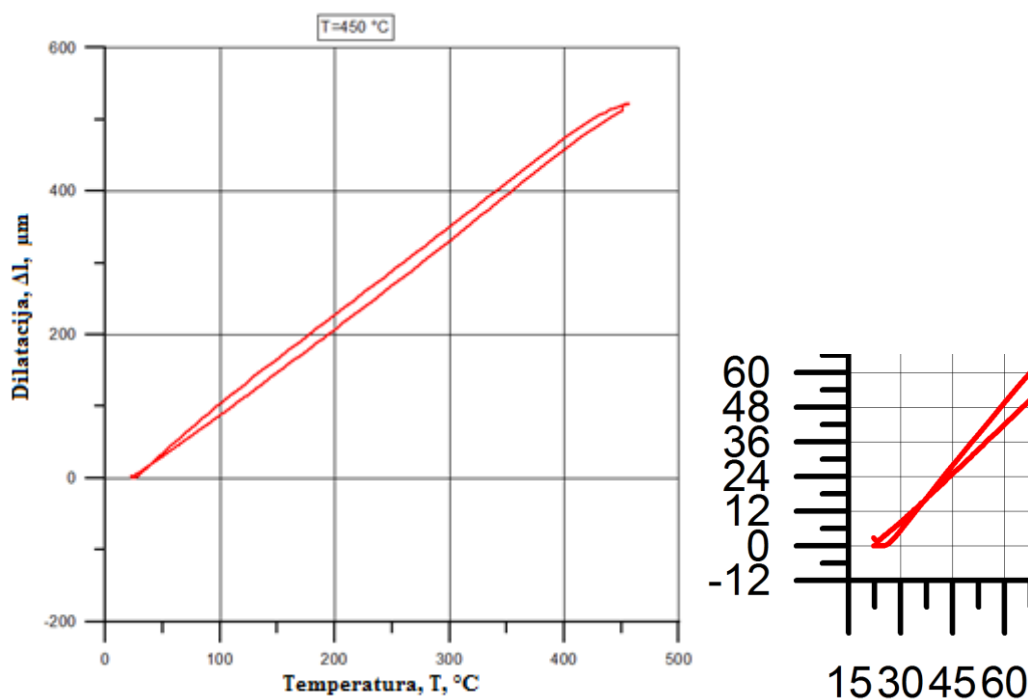
Slika 7.6. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.2 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



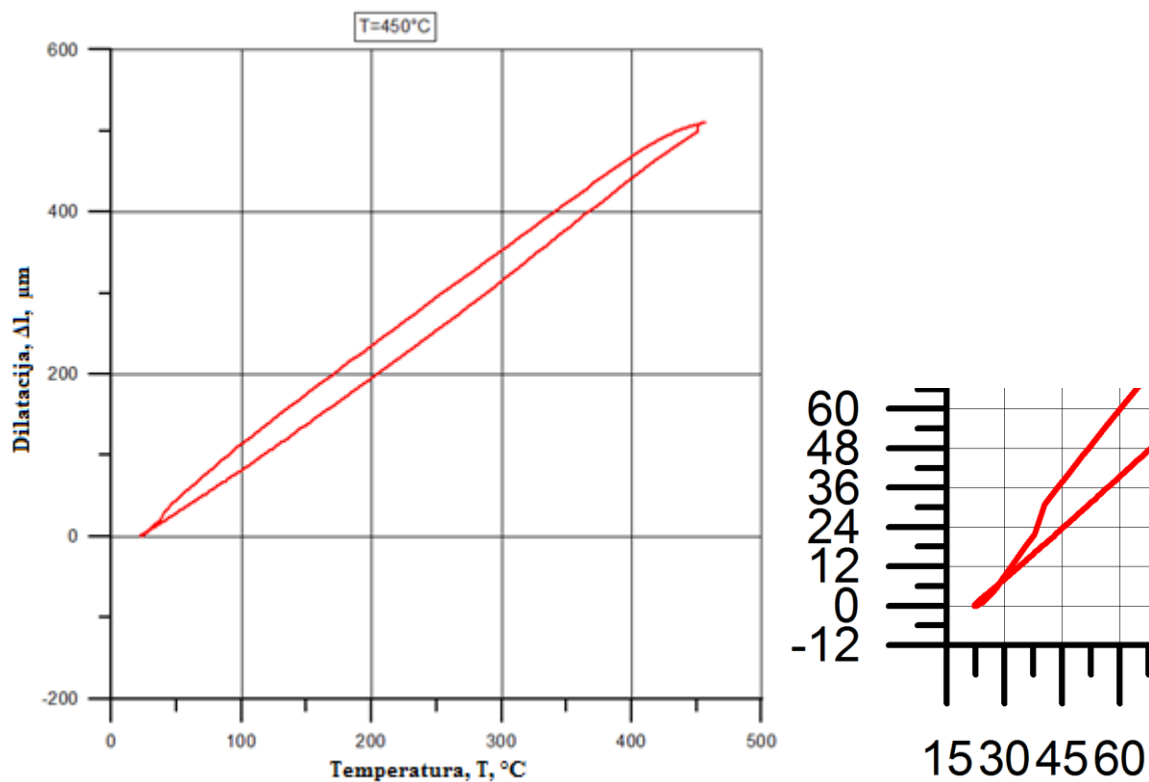
Slika 7.7. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.3 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



Slika 7.8. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.4 tijekom zagrijavanja na temperaturu 450  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

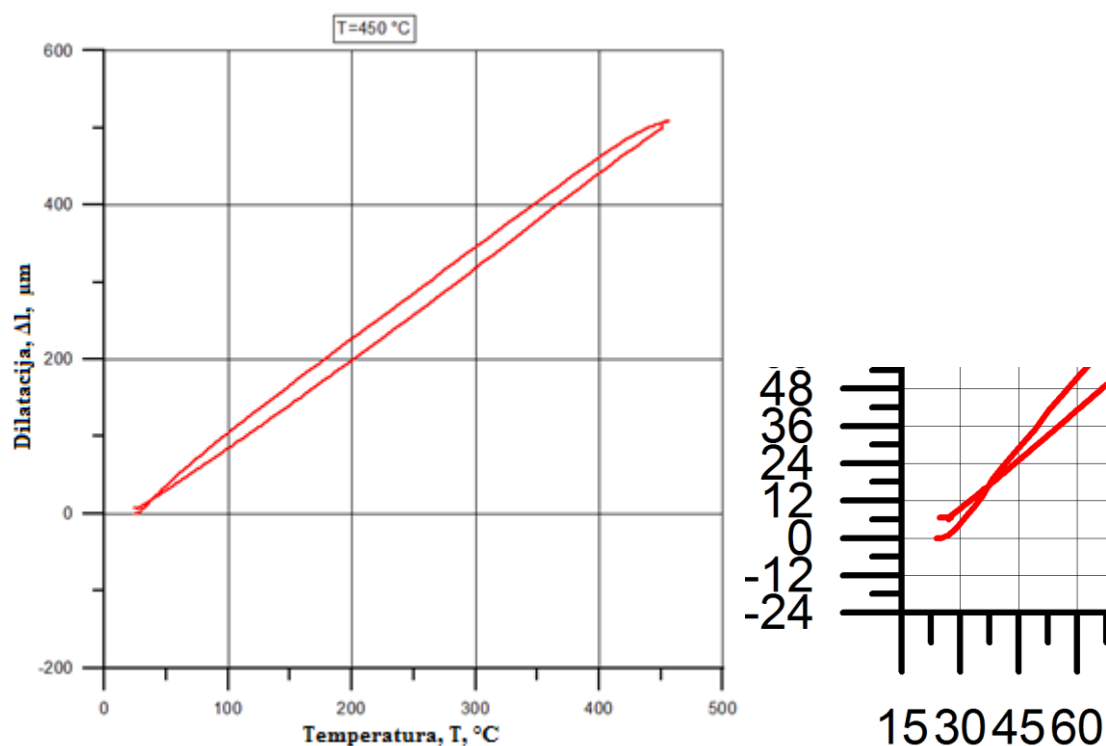


Slika 7.9. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.5 tijekom zagrijavanja na temperaturu  $450^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



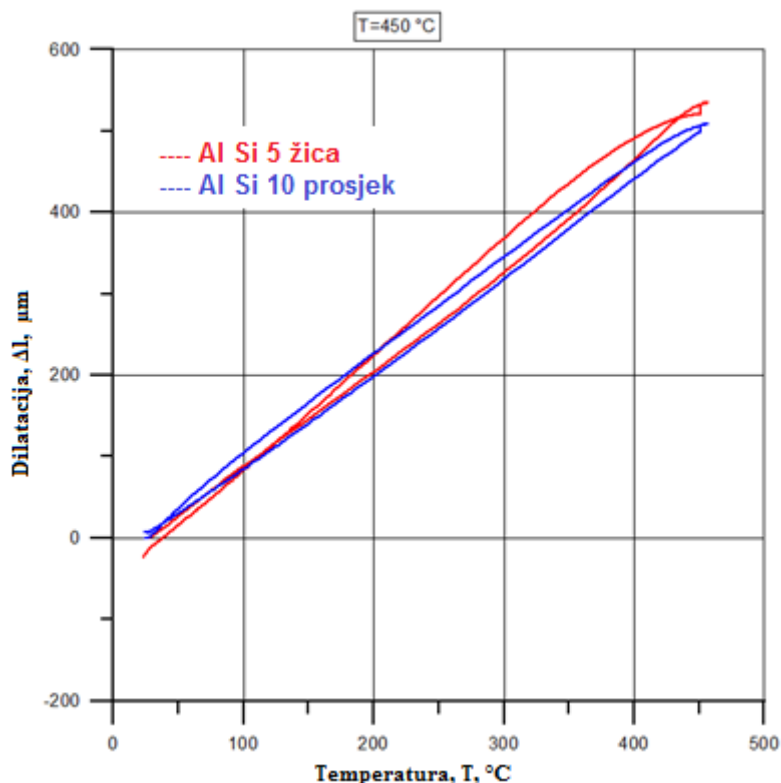
Slika 7.10. Dilatogram AlSi10 pjena-450 br.6 tijekom zagrijavanja na temperaturu  $450^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

Slika 7.11. pokazuje krivulju srednjih vrijednosti uzoraka AlSi10-450 od br.1 do br.6.



Slika 7.11. Dilatogram srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-450 od br.1. do br.6. tijekom zagrijavanja na temperaturu 450  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

Radi bolje preglednosti i usporedbe napravljen je dijagram koji pokazuje crvenu krivulju AlSi5 žica-450 i plavu krivulju srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-450 od br.1 do br.6.



Slika 7.12. Usporedba dilatometra AlSi5 žica-450 i srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-450 od br.1 do br.6.

Na prikazanim dijagramima kod svih uzoraka primjećuje se linearan porast dilatacije koji će poslije biti opisan koeficijentima dilatacije. Hlađenje je također prikazano linearnom krivuljom. Svaki uzorak ima različitu konačnu dilataciju.

Slika 7.4. prikazuje stezanje uzorka aluminijske žice AlSi5 žica-450 za 22  $\mu\text{m}$ . Produljenja uzoraka aluminijskih pjena AlSi10 pjena-450 od br.1. do br.3. u iznosima 10,8, 11,3 odnosno 9,4 prikazana su na slikama 7.5., 7.6. i 7.7.

3,4  $\mu\text{m}$  je vrijednost stezanja uzorka AlSi10-pjena 450-br.4. koje se može vidjeti na slici 7.8. Vrijednosti produljenja uzoraka AlSi10 pjena-450 br.5. i br.6. (2,6 i 0,4  $\mu\text{m}$ ) nalaze se na slikama 7.9. i 7.10.

Krivulja srednjih vrijednosti dilatacija uzoraka aluminijskih pjena ispitanih na temperaturi 450 $^{\circ}\text{C}$  prikazana je slikom 7.11. Srednja vrijednost dilatacija uzoraka aluminijskih pjena za danu temperaturu iznosi 6,5  $\mu\text{m}$ .

Dijagram 7.12. koji sadrži krivulju srednjih vrijednosti dilatacija uzoraka pjena i krivulju uzorka aluminijske žice pokazuje slično ponašanje krivulje aluminijskih pjena i krivulje aluminijske žice tijekom zagrijavanja i hlađenja. Male razlike u kemijskom sastavu uzrok su većeg nagiba krivulje AlSi5 žice od nagiba krivulje srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-450.

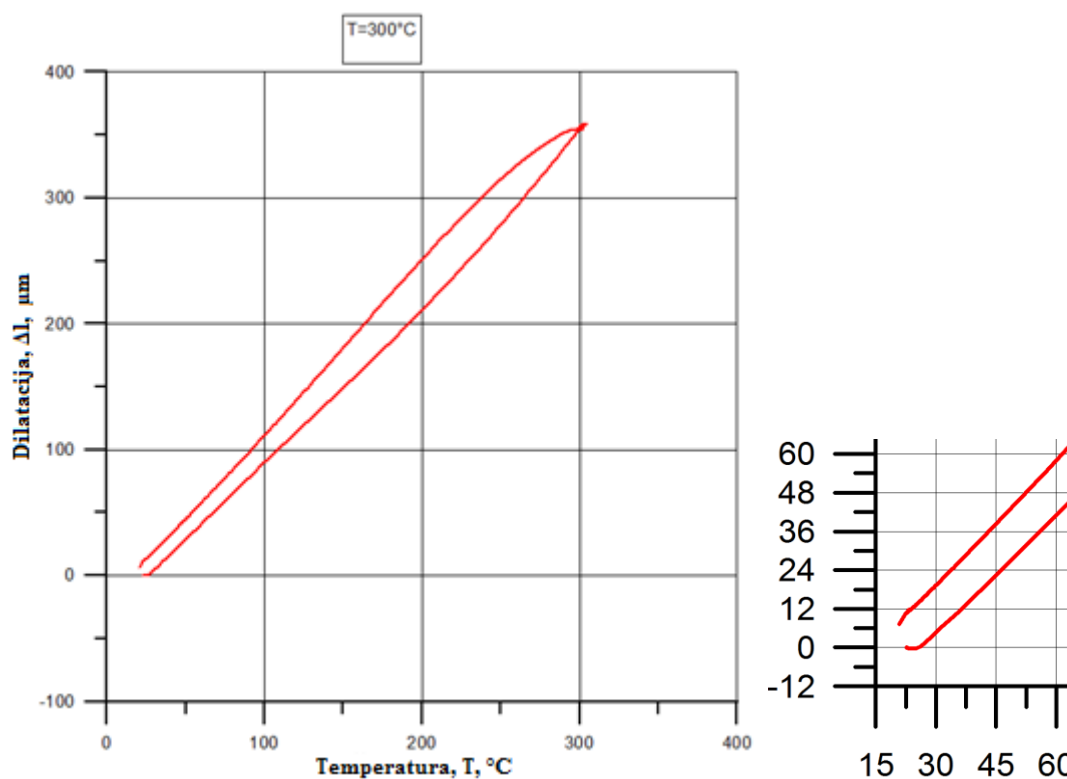
Uzorak AlSi5 žica-450 se skratio  $22\text{ }\mu\text{m}$  što je posljedica dodatnog rekristalizacijskog žarenja, dok su se uzorci aluminijskih pjena u prosjeku produljili  $6,5\text{ }\mu\text{m}$ .

Završetkom ispitivanja na  $450^{\circ}\text{C}$  pripremili su se uzorci za ispitivanje na temperaturi  $300^{\circ}\text{C}$ .

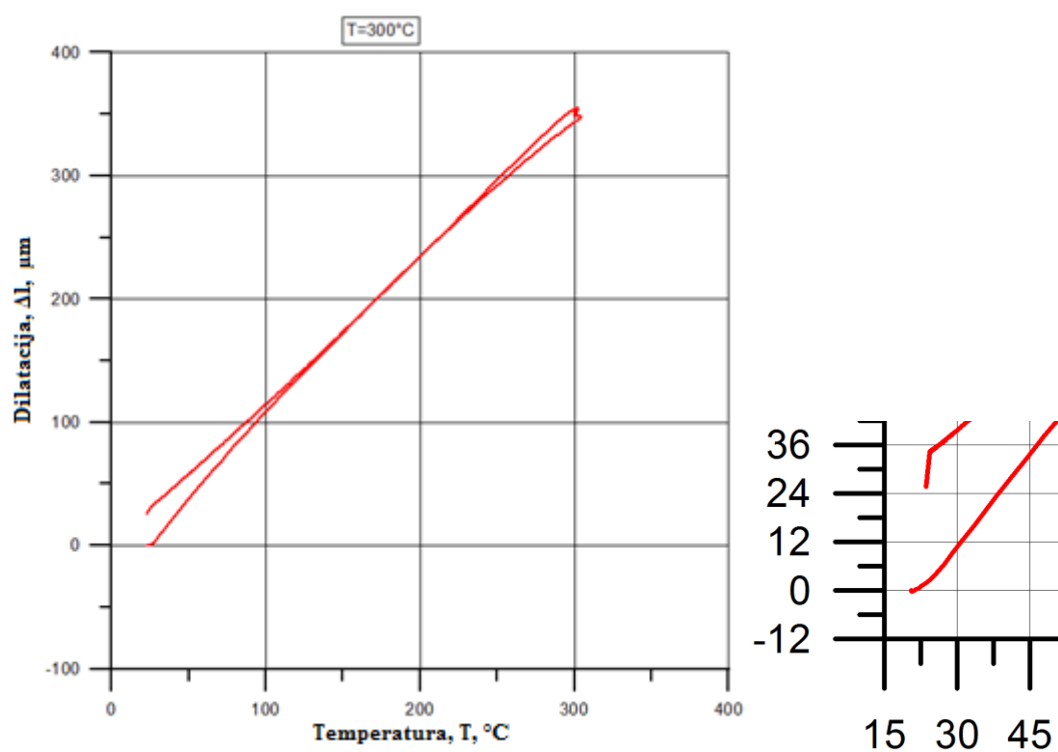
### Uzorci grijani na $300^{\circ}\text{C}$

Na dilatometru je na temperaturi  $300^{\circ}\text{C}$  ispitana aluminijska žica oznake AlSi5 žica-300 te šest uzoraka aluminijskih pjena oznaka AlSi10 pjena-300 od br.1. do br.6.

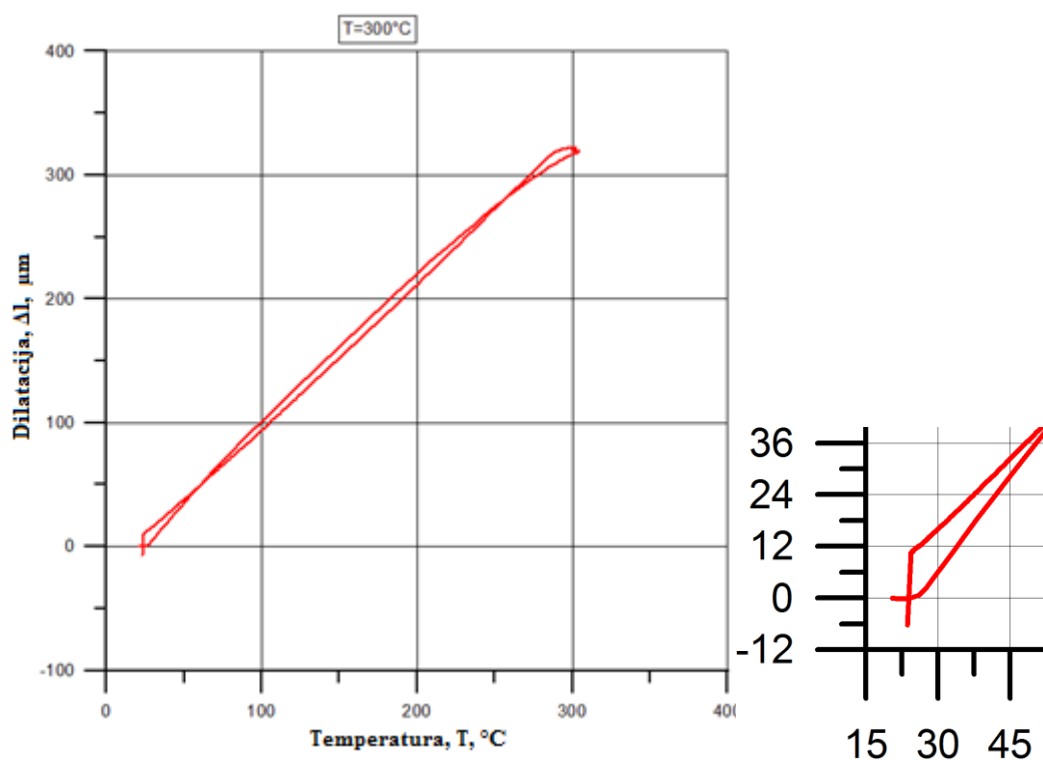
Promjenu duljine AlSi5 žice-300 (odžarene na  $450^{\circ}\text{C}$ ) tijekom ispitivanja prikazuje slika 7.13. Rezultati ispitivanja za uzorke AlSi10 pjena-300 od br.1 do br.6. prikazani su na slikama 7.14. do 7.19.



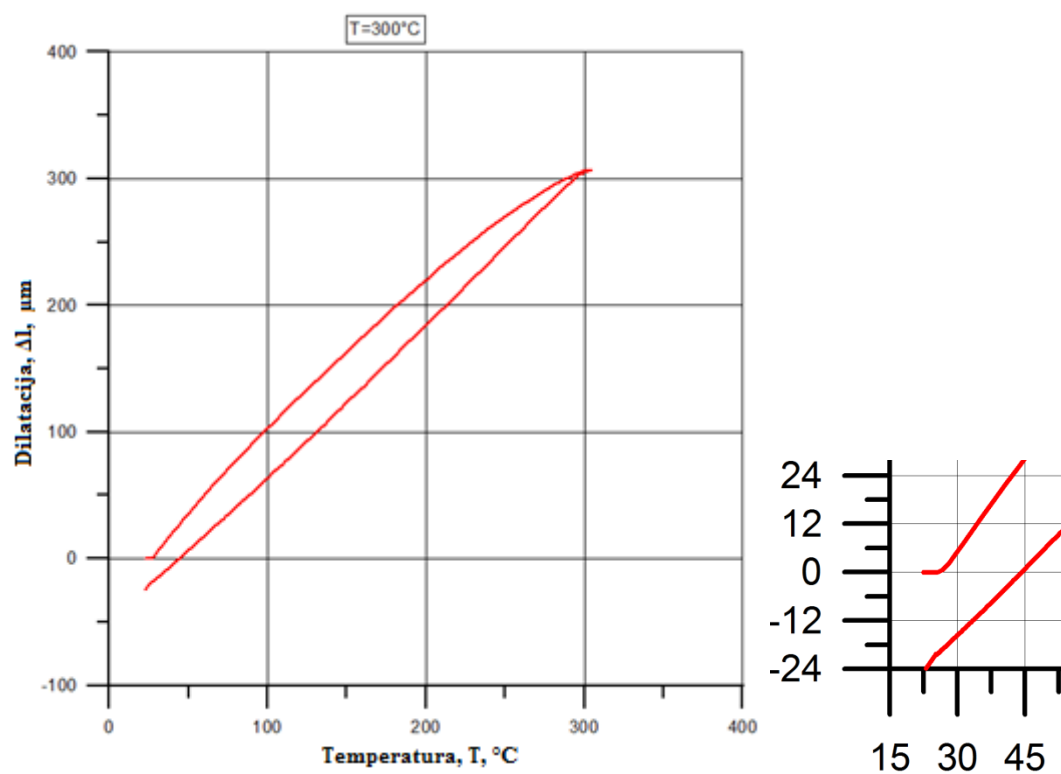
Slika 7.13. Dilatogram uzorka AlSi5 žica-300 tijekom zagrijavanja na temperaturu  $300^{\circ}\text{C}$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



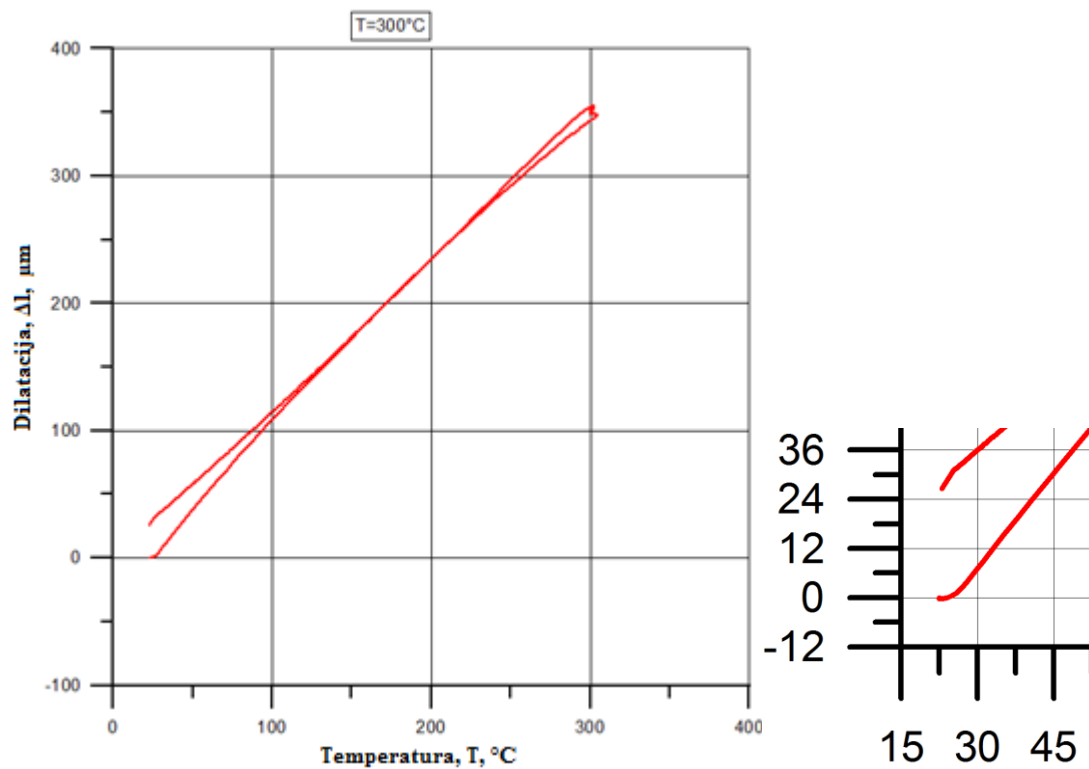
Slika 7.14. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.1 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



Slika 7.15. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.2 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

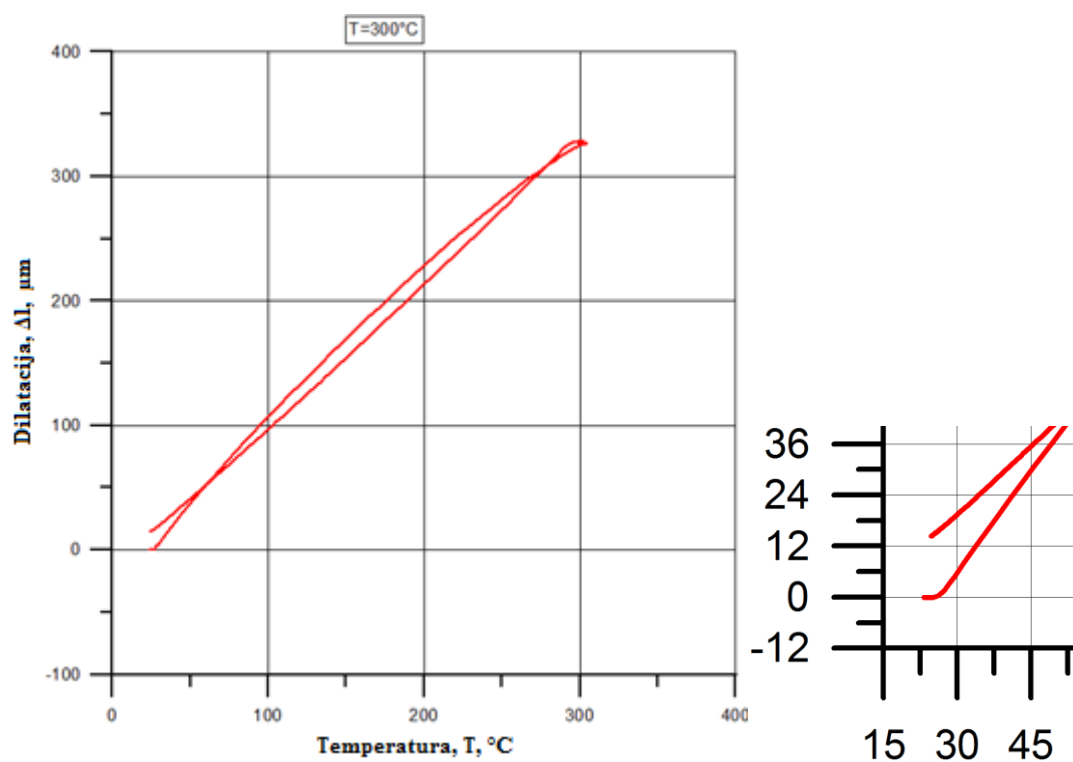


Slika 7.16. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.3 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300  $^{\circ}\text{C}$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

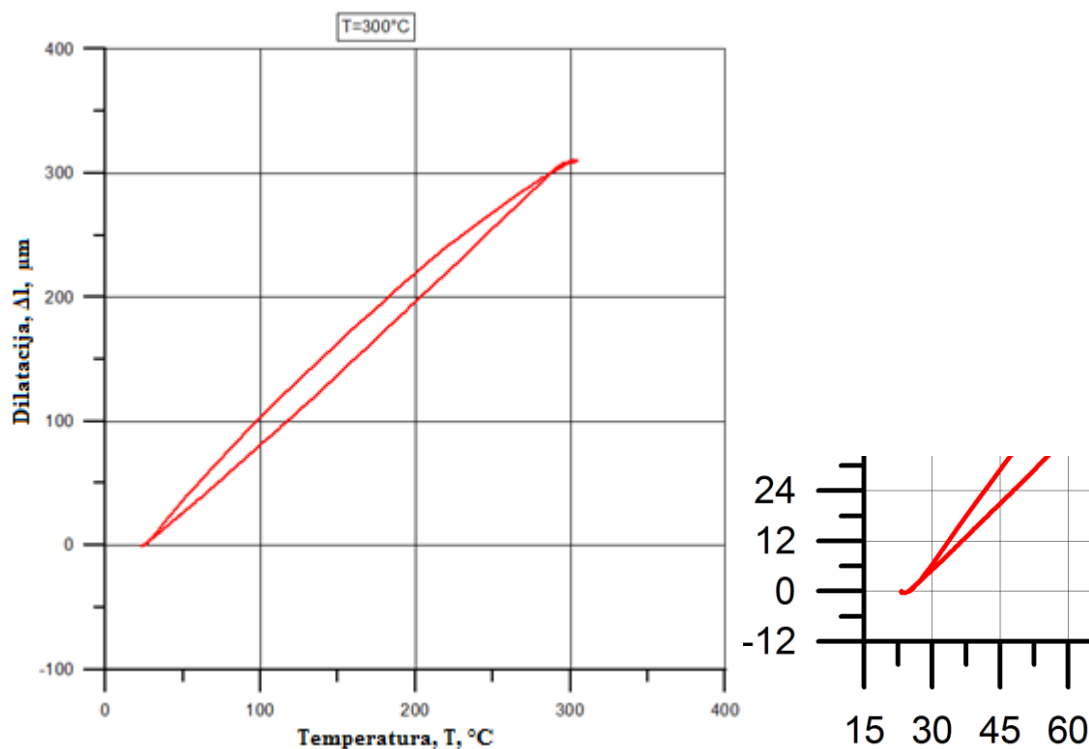


Slika 7.17. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.4 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300  $^{\circ}\text{C}$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



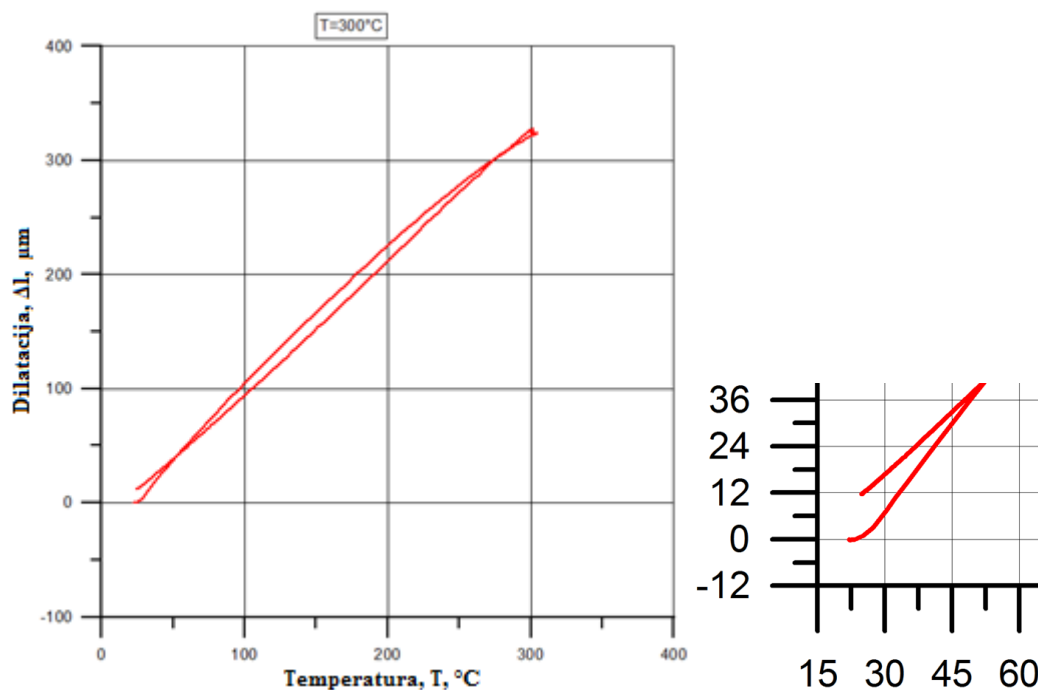


Slika 7.18. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.5 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



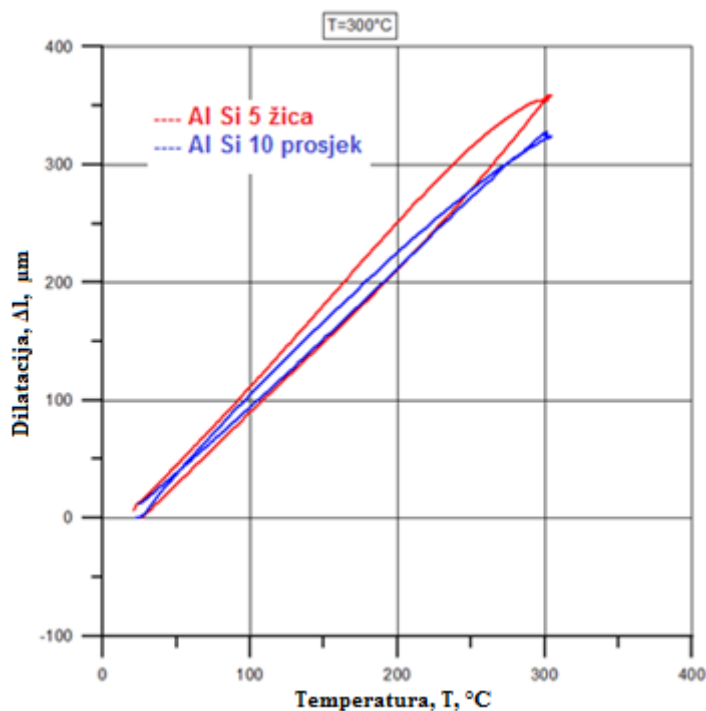
Slika 7.19. Dilatogram AlSi10 pjena-300 br.6 tijekom zagrijavanja na temperaturu 300  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

Slika 7.11. pokazuje krivulju srednjih vrijednosti uzoraka AlSi10-300 od br.1 do br.6.



Slika 7.20. Dilatogram srednje vrijednosti AlSi10 pjena-300 od br.1 do br.6. tijekom zagrijavanja na temperaturu 300 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

Radi lakše usporedbe ponašanja napravljen je dijagram usporedbe na slici 7.21. koji pokazuje crvenu krivulju AlSi5 žica-300 i plavu krivulju srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-300 od br.1 do br.6.



Slika 7.21. Usporedba dilatometra AlSi5 žica-300 i srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-300 od br.1 do br.6.

Svi uzorci ispitani na 300°C pokazuju linearan porast odnosno pad dilatacije tijekom zagrijavanja odnosno hlađenja.

Na dijagramu 7.13. može se očitati konačna dilatacija uzorka aluminijske žice grijane na temperaturu 300°C koja iznosi 7,4 μm.

Zagrijavanjem i hlađenjem uzoraka AlSi10 pjena br.1., br.3. i br.6. došlo je do skraćivanja uzoraka za 6,1, 23,7 odnosno 0,1 μm što se vidi na dijagramima 7.14., 7.16. odnosno 7.19. Uzorci AlSi10 pjena br.2., br.4., i br.5. produljili su se redom 25,8, 26,7, odnosno 14,3 μm. Produljenja navedenih uzoraka prikazana su na slikama 7.15., 7.17. i 7.18.

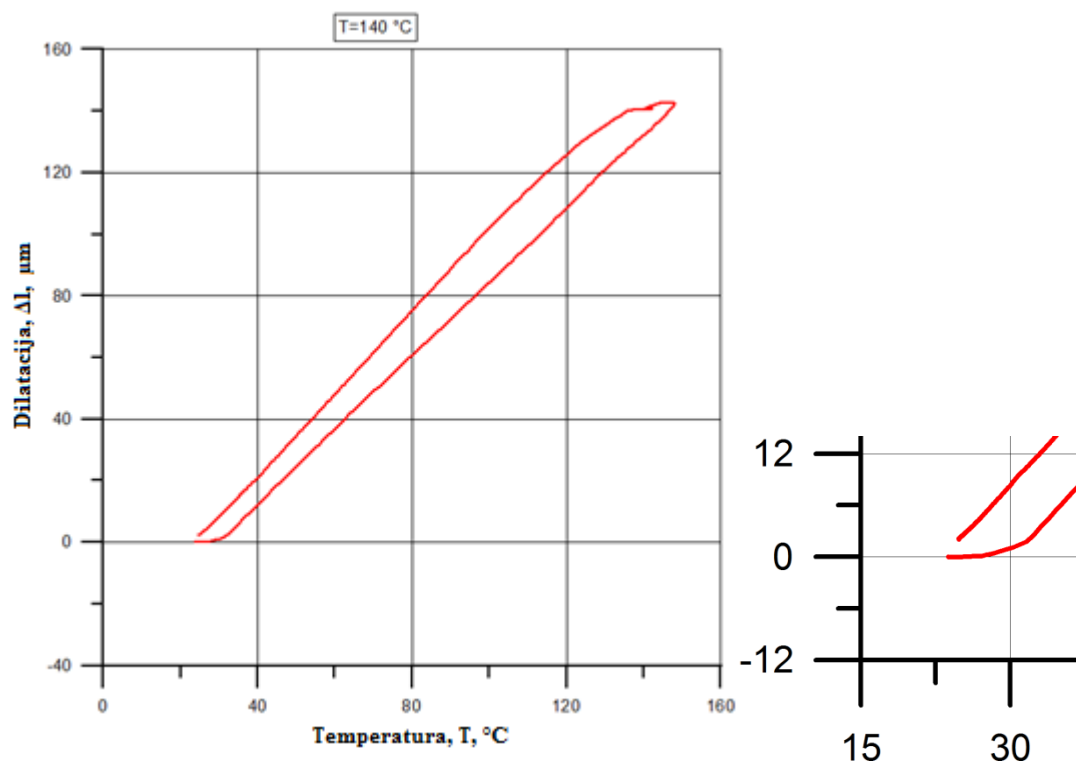
Srednja vrijednost konačnih dilatacija uzoraka AlSi10 pjena-300 od br.1. do br.6. koja je jednaka 11,6 μm vidi se na dijagramima 7.20. i 7.21. Slično ponašanje aluminijskih pjena i aluminijske žice tijekom zagrijavanja na temperaturu 300°C i hlađenja prikazano je dijagramom 7.21. Razlika konačnih dilatacija uspoređenih krivulja iznosi 4,2 μm što nije značajna razlika.

Zadnja ispitivanja u radu provedena su na temperaturi 140°C.

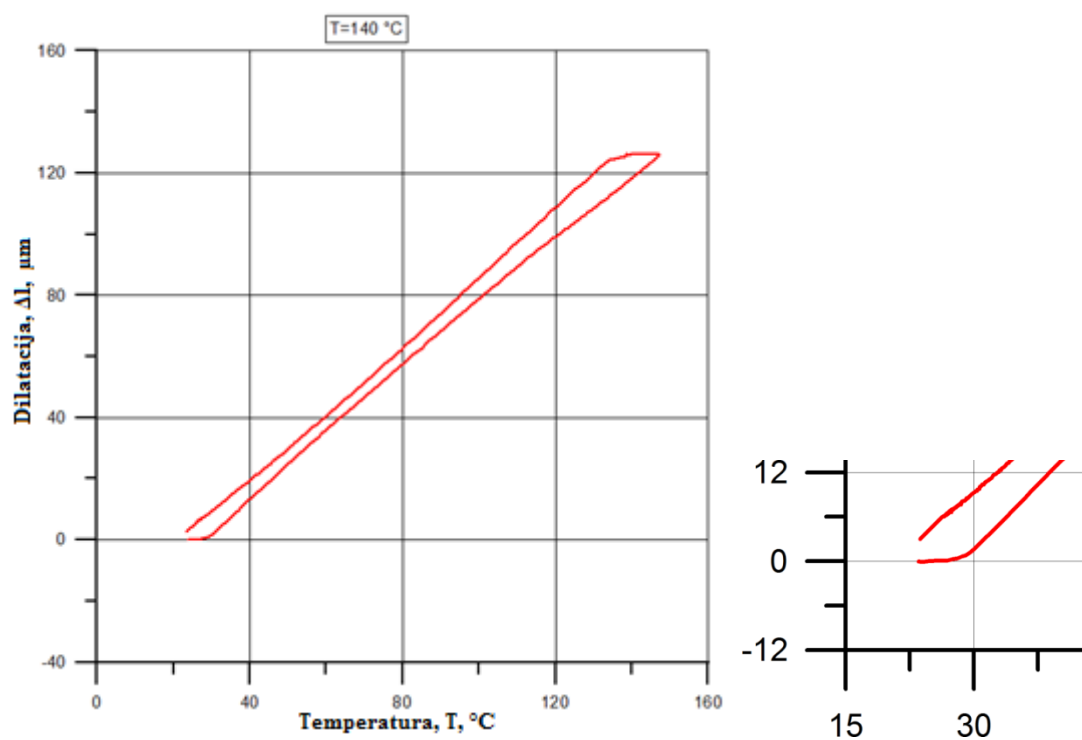
### Uzorci grijani na 140 °C

Na 140 °C ispitana je aluminijska žica oznake AlSi5 žica-140 te šest uzoraka aluminijskih pjena oznaka AlSi10 pjena-140 od br.1. do br.6.

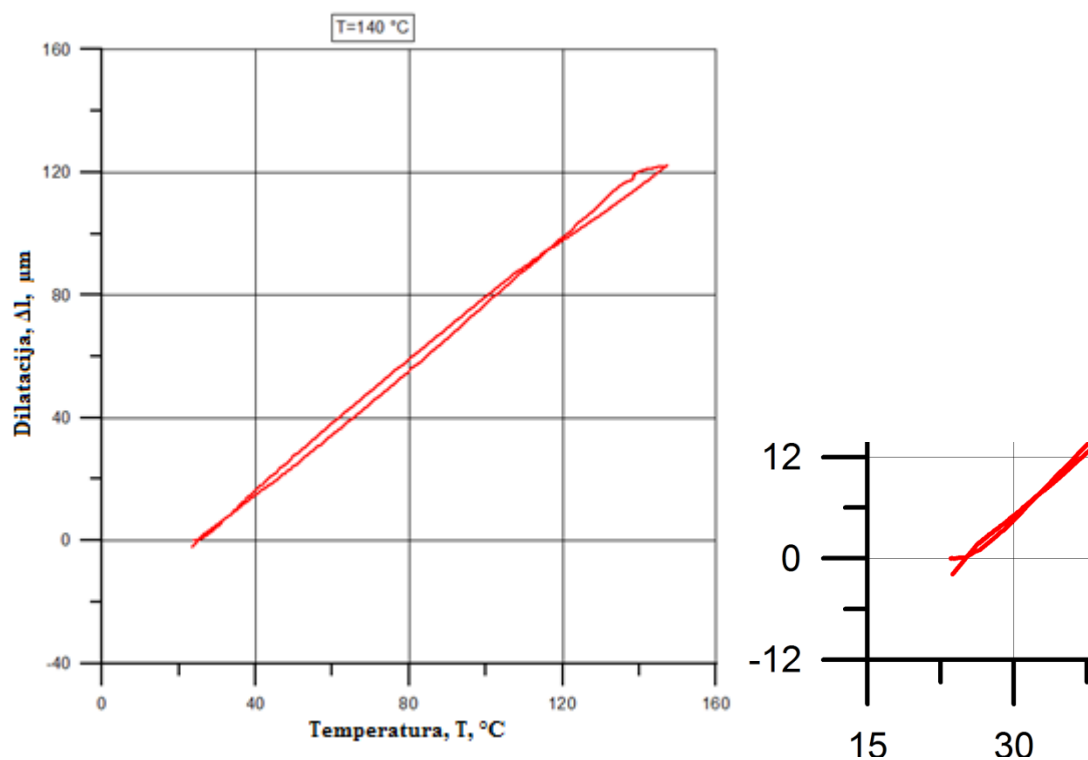
Rezultati ispitivanja za uzorak AlSi5 žica-450 (prije žarene na 450°C) prikazani su na slici 7.22. dok slike 7.23. do 7.28. prikazuju rezultate za uzorke AlSi10 pjena-300 od br.1 do br.6.



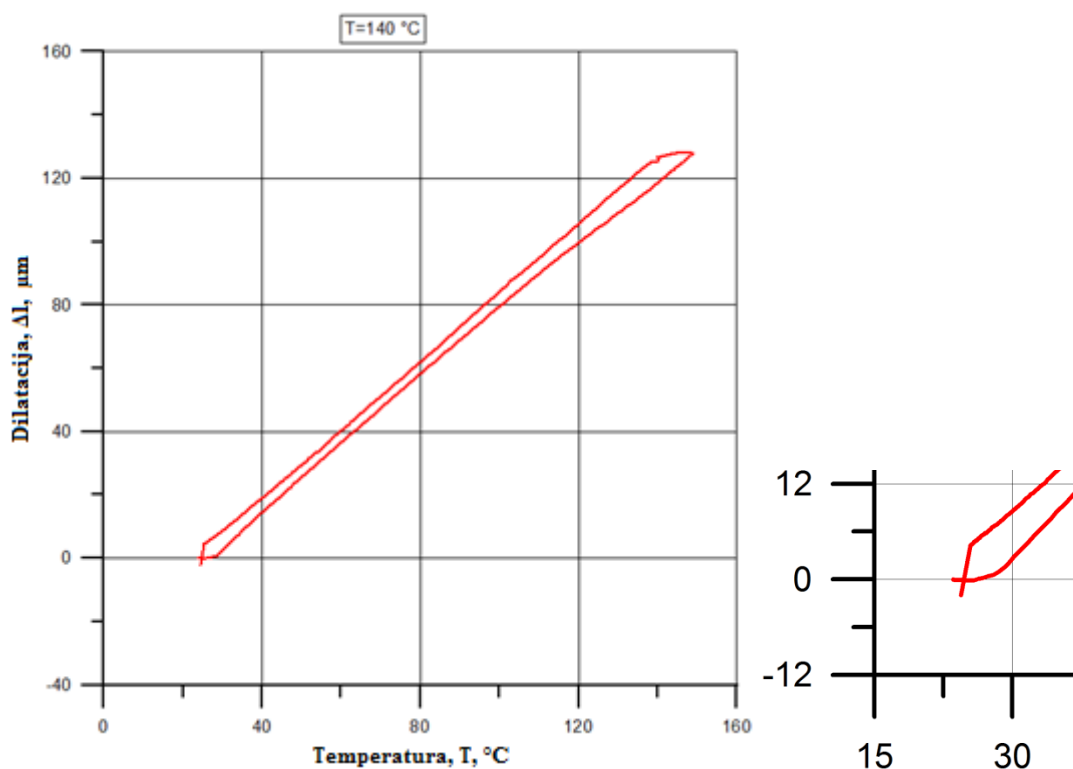
Slika 7.22. Dilatogram AlSi5 žica-140 uzorka tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



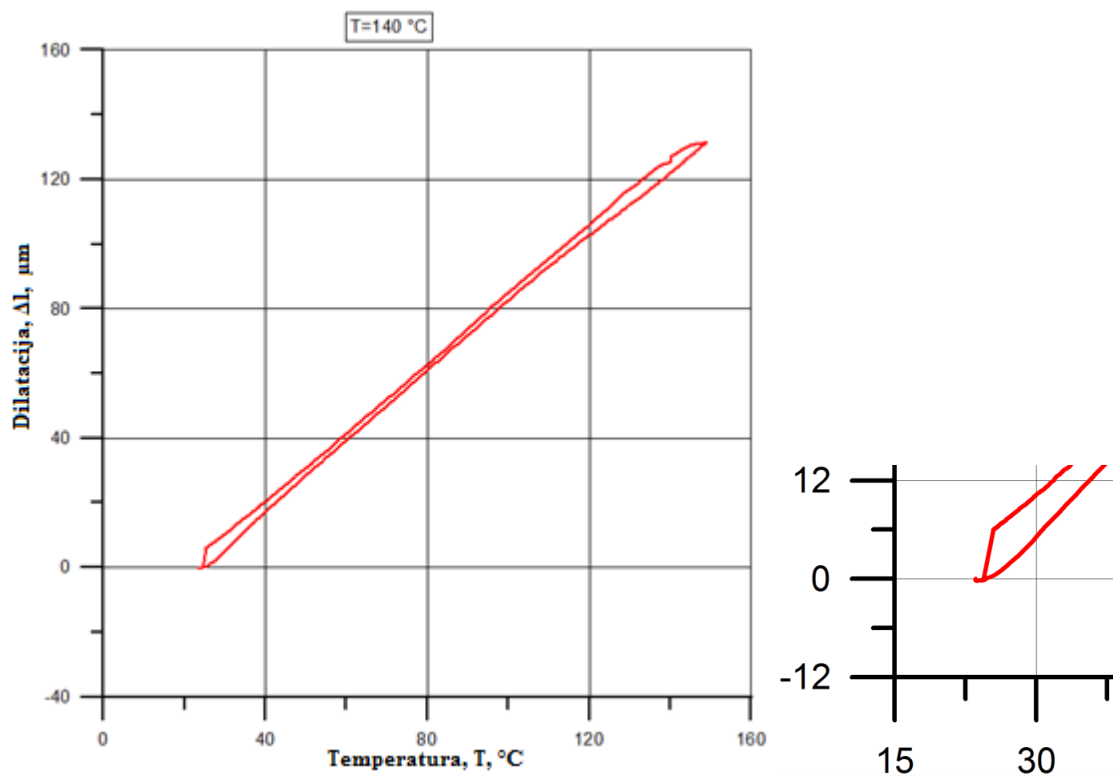
Slika 7.23. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.1 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



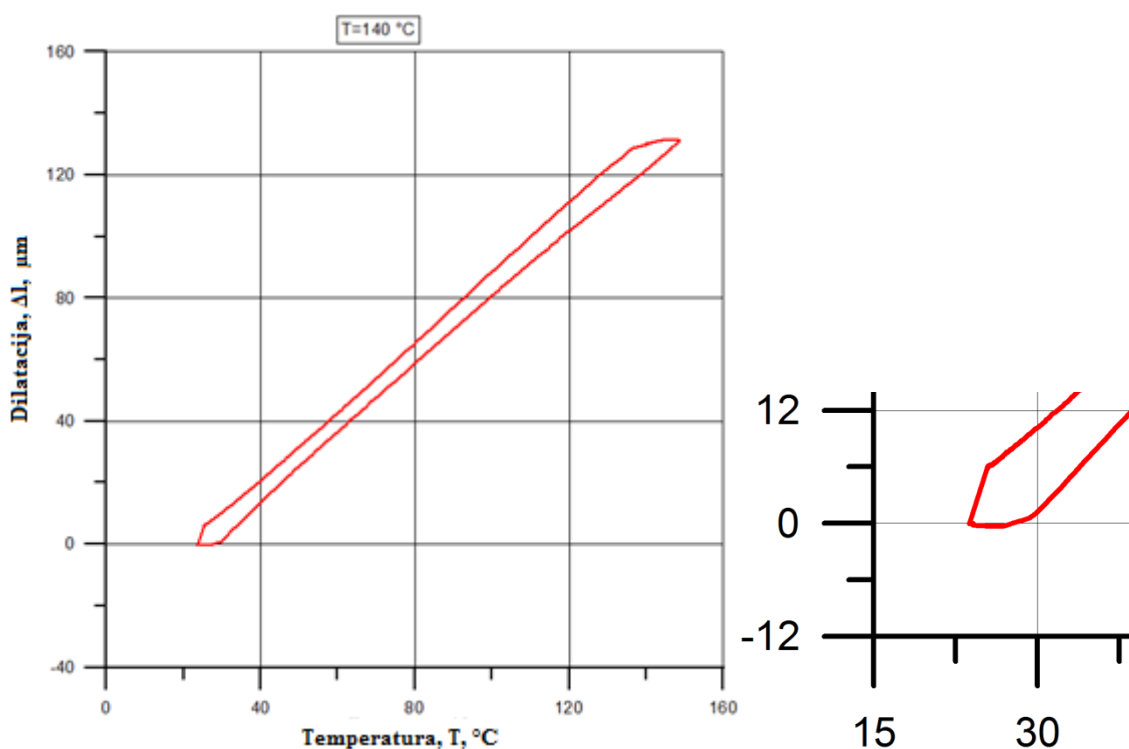
Slika 7.24. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.2 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



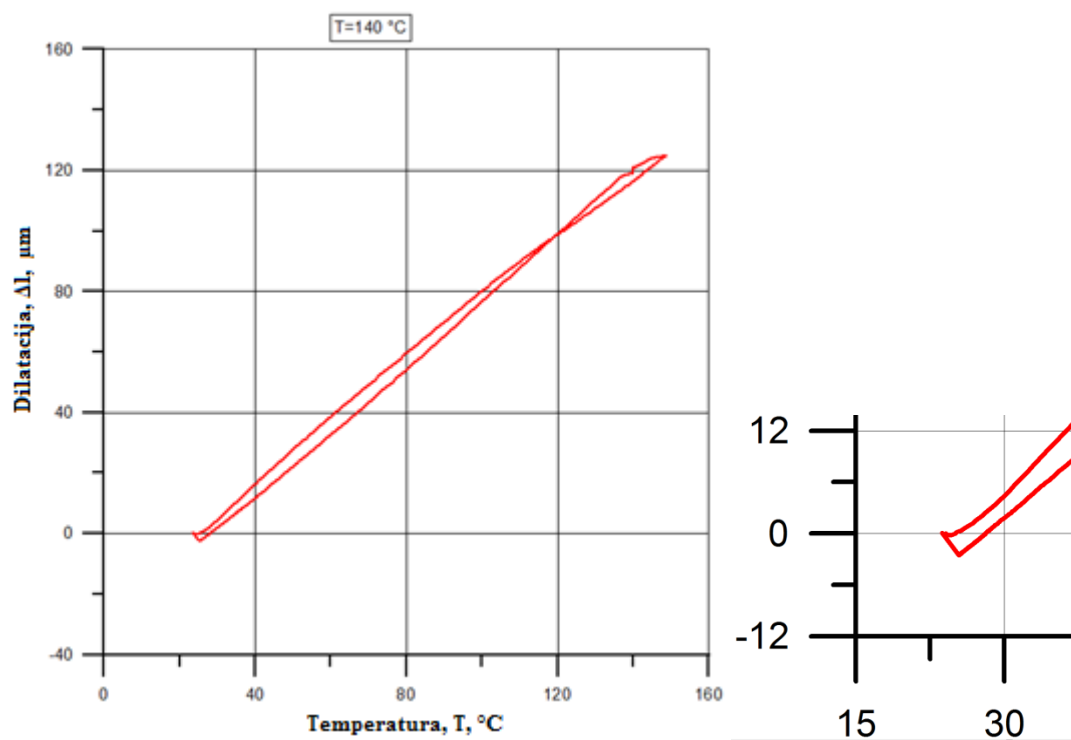
Slika 7.25. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.3 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



Slika 7.26. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.4 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

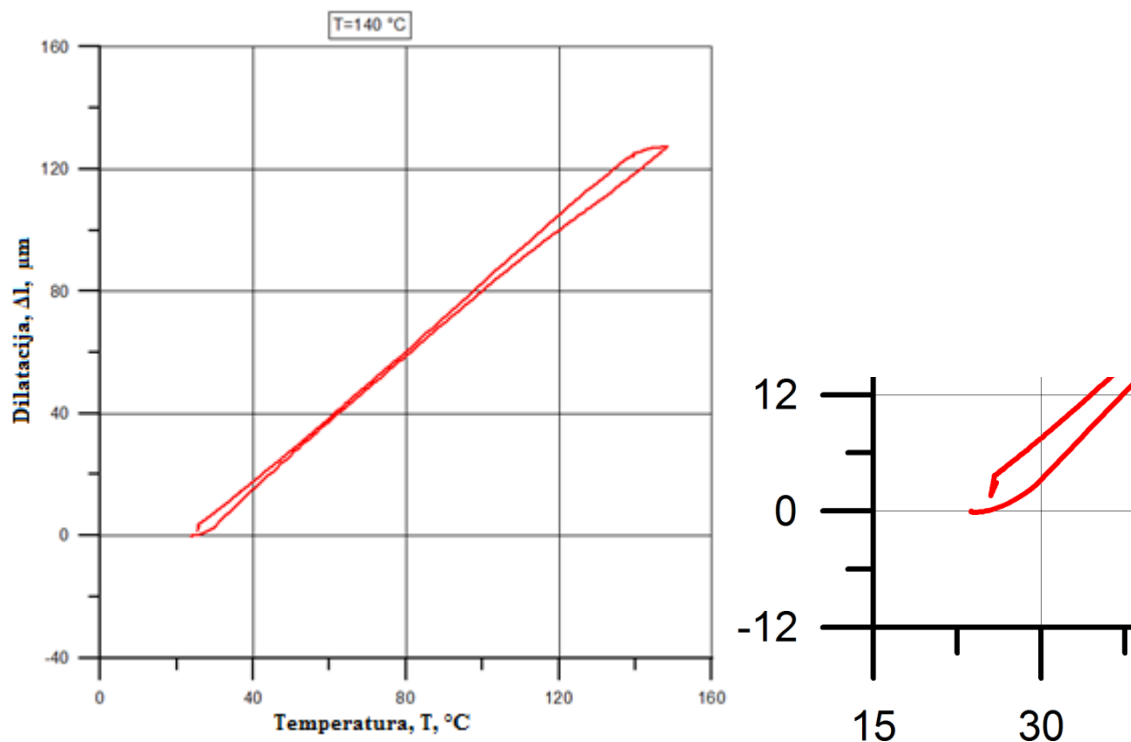


Slika 7.27. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.5 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja



Slika 7.28. Dilatogram AlSi10 pjena-140 br.6 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

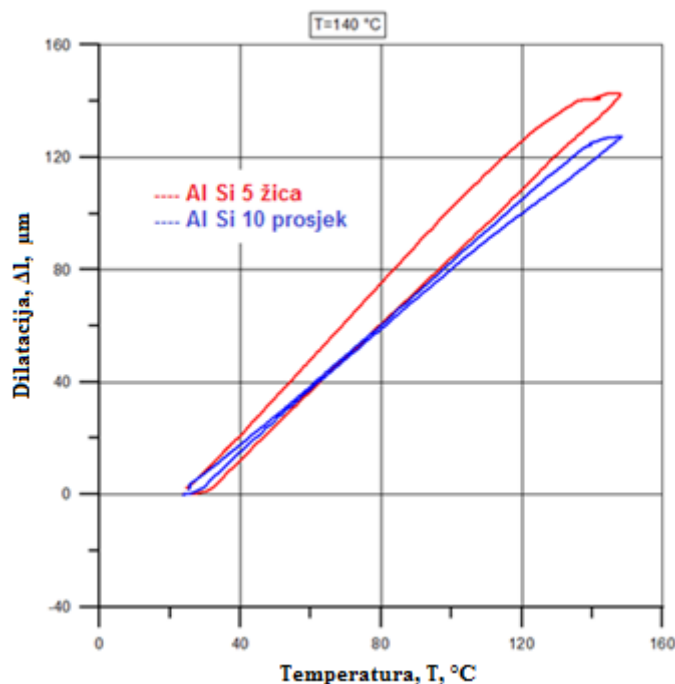
Slika 7.29. pokazuje krivulju srednjih vrijednosti uzoraka AlSi10-140 od br.1 do br.6.



Slika 7.29. Dilatogram prosjeka AlSi10 pjena-140 tijekom zagrijavanja na temperaturu 140  $^{\circ}C$ , držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja

Radi lakše usporedbe ponašanja napravljen je dijagram usporedbe na slici 7.30. koji pokazuje crvenu krivulju AlSi5 žica-140 i plavu krivulju srednjih vrijednosti AlSi10 pjena-140 od br.1 do br.6.





Slika 7.30. Dilatogram AlSi5 žica-140 i srednje vrijednosti AlSi10 pjena-140 od br.1 do br.6. tijekom zagrijavanja na temperaturu 140 °C, držanja na temperaturi 2 sata i hlađenja vodom

Tijekom zagrijavanja uzoraka na temperaturu 140°C u dijagramima je vidljivo linearno produljenje uzoraka. Hlađenjem se uzorci linearno stežu na različite konačne dilatacije.

0,53 μm je produljenje koje je izmjereno nakon završetka ispitivanja na uzorku AlSi5 žica-140. (Slika 7.22.)

Uzorci aluminijskih pjena rednih brojeva 1, 3, 4 i 5 ispitani na temperaturi 140°C pokazali su minimalna produljenja 3, 1,5, 2,8 odnosno 3,8 μm. Krivulje navedenih uzoraka prikazane su na slikama 7.23., 7.25., 7.26. odnosno 7.27. Uzorci AlSi10 pjena-140 br.2. i br.6. skratili su se za 1,8 odnosno 5,4 μm. (Slike 7.24. i 7.28.)

Dijagram 7.29. prikazuje krivulju srednjih vrijednosti dilatacija aluminijskih pjena. Tijekom ispitivanja na temperaturi 140°C srednja vrijednost produljenja pjena iznosila je 2,8 μm. U dijagramu 7.30. prikazano je ponašanje aluminijske žice i krivulja srednjih vrijednosti dilatacija aluminijskih pjena. Konačne dilatacije dviju krivulja su približno jednake (0,53μm žica, a 2,8 μm srednja vrijednost dilatacija pjena) dok je nagib krivulje žice veći od nagiba krivulje pjene.

Radi bolje preglednosti rezultata u tablicama 7.1., 7.2., 7.3. i 7.4. prikazane su konačne dilatacije svih uzoraka.

Tablica 7.1. Konačne dilatacije aluminijskih žica nakon žarenja

Uzorak	Dilatacija $\mu\text{m}$
Al Si 5 žica-450	-124,9
Al Si 5 žica-300	-153,3
Al Si 5 žica-140	-144,5

Tablica 7.2. Konačne dilatacije uzoraka zagrijvanih na 450 °C

Uzorak	Dilatacija $\mu\text{m}$
Al Si 5 žica-450	-22
Al Si 10 pjena -450 br.1	10,8
Al Si 10 pjena -450 br.2	11,3
Al Si 10 pjena -450 br.3	9,4
Al Si 10 pjena -450 br.4	-3,4
Al Si 10 pjena -450 br.5	2,6
Al Si 10 pjena -450 br.6	0,4
Al Si 10 pjena -450 prosjek	6,5

Tablica 7.3. Konačne dilatacije uzoraka zagrijvanih na 300 °C

Uzorak	Dilatacija $\mu\text{m}$
Al Si 5 žica-300	7,4
Al Si 10 pjena -300 br.1	-6,1
Al Si 10 pjena -300 br.2	25,8
Al Si 10 pjena -300 br.3	-23,7
Al Si 10 pjena -300 br.4	26,7
Al Si 10 pjena -300 br.5	14,3
Al Si 10 pjena -300 br.6	-0,1
Al Si 10 pjena -300 prosjek	11,6

Tablica 7.4. Konačne dilatacije uzoraka zagrijvanih na 140 °C

Uzorak	Dilatacija $\mu\text{m}$
Al Si 5 žica-140	0,53
Al Si 10 pjena-140 br.1	3,0
Al Si 10 pjena-140 br.2	-1,8
Al Si 10 pjena-140 br.3	1,5
Al Si 10 pjena-140 br.4	2,8
Al Si 10 pjena-140 br.5	3,8
Al Si 10 pjena-140 br.6	-5,4
Al Si 10 pjena-140 prosjek	2,8

Iz dijagrama i tablica vidljivo je da su konačne dilatacije uzoraka aluminijskih pjena beznačajne i vrijednosti odstupanja se kreću uglavnom do desetak mikrometara što se može objasniti netočnošću mjerenja. Nekoliko uzoraka pokazuje veća odstupanja, ali to ne utječe značajno na rezultate ispitivanja. Srednja vrijednost uzoraka aluminijskih pjena grijanih na 140 °C iznosi 2,8  $\mu\text{m}$ . Dok srednja vrijednost dilatacije pjenastih uzoraka grijanih na 300 i 450 °C iznosi 11,6 odnosno 6,5  $\mu\text{m}$ .

Vrijednosti dilatacija aluminijskih žica zagrijvanih na iste temperature, ne razlikuju se značajno od dilatacija aluminijskih pjena, osim kod uzoraka grijanih na 450°C.

Radi usporedbe pjena i aluminijskih žica izračunate su vrijednosti koeficijenata toplinske dilatacije svih uzoraka i prikazani u obliku tablica.

## 7.2. Koeficijenti toplinske dilatacije

Tablica 7.5. prikazuju koeficijente dilatacije tijekom ispitivanja uzoraka.

Tablica 7.5. Koeficijenti dilatacije svih uzoraka

Temperatura ispitivanja Uzorak	450 °C	300 °C	140 °C
AlSi10 pjena br.1	23,58	22,63	20,34
AlSi10 pjena br.2	23,54	23,44	19,74
AlSi10 pjena br.3	23,72	22,02	20,38
AlSi10 pjena br.4	23,63	24,74	20,96
AlSi10 pjena br.5	24,23	23,46	20,04
AlSi10 pjena br.6	23,71	22,29	21,02
Prosjek AlSi10 pjena	23,73	23,09	20,41
AlSi5 žica	24,94	25,72	22,89

Napomena :Sve vrijednosti u tablici izražene su u  $K^{-1}$  i uvećane su  $10^6$  puta.

Koeficijenti toplinske dilatacije aluminijskih pjena AlSi10 pri temperaturama 450, 300 i 140°C iznose 23,73, 25,72 odnosno 20,41. Dok uzorci AlSi5 žice za iste temperature imaju vrijednosti 24,94, 25,72 odnosno 22,89.

Razlika koeficijenata toplinske dilatacije aluminijskih pjena i aluminijskih žica je vrlo mala što se može pripisati u razlikama u kemijskom sastavu koji su slični, ali ne i isti.

Kako bi se otklonile sumnje u moguće strukturne promjene u aluminijskim žicama pristupilo se ispitivanju tvrdoće.

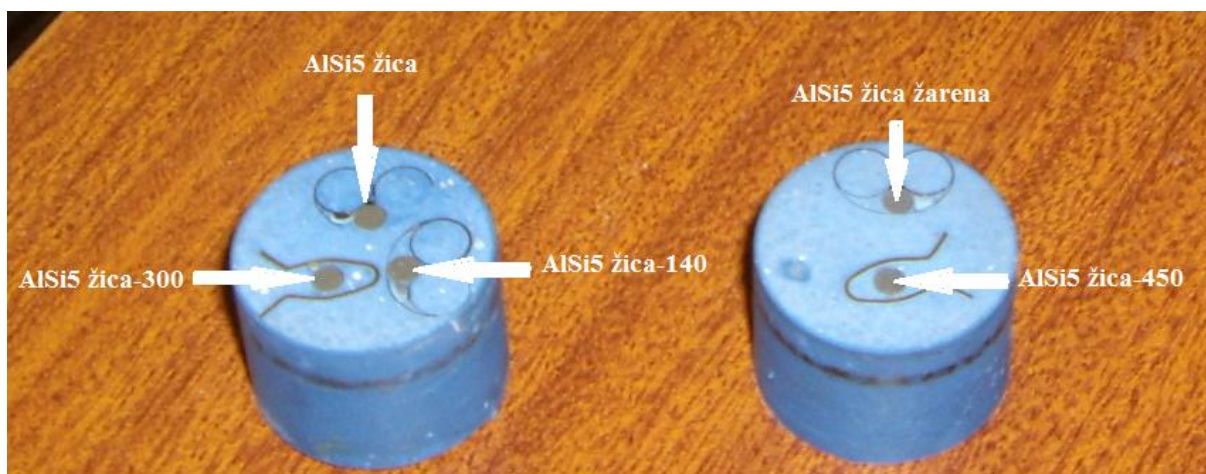
## 8. ISPITIVANJE TVRDOĆE

Tvrdoća je ispitana na uzorcima aluminijske žice u svrhu utvrđivanja strukturnih promjena u materijalu tijekom ispitivanja. Ispitivanja na uzorcima aluminijskih pjena nije moguće provesti zbog male debljine stijenki ćelija aluminijskih pjena.

Uzorci koji su ispitani su AlSi5 žica-140, AlSi5 žica-300 i AlSi5 žica-140. Tvrdoća se također izmjerila na uzorku aluminijske žice koja nije podvrgnuta toplinskoj obradi (AlSi5 žica), te uzorku žice koja je samo žarena na 450°C (AlSi5 žica žarena).

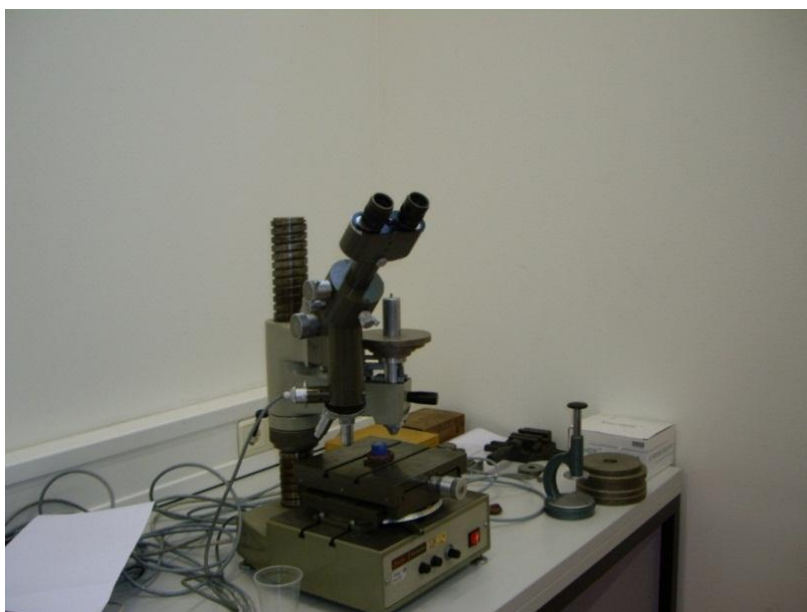
Radi lakšeg ispitivanja uzorci su zaliveni u polimernu smjesu. (Slika 8.1.)

Žice su zalivene u dva ispitna uzorka. U prvome uzorku nalazila se žica koja nije podvrgnuta toplinskoj obradi AlSi5 žica, AlSi5 žica-300 i AlSi5 žica-140, a u drugome ispitnom uzorku zalile su se žice AlSi5 žica-450 i žica koja je samo žarena na 450°C.



Slika 8.1. Zaliveni uzorci za ispitivanje tvrdoće

Ispitivanja su se provodila na tvrdomjeru marke Zwick (Slika 8.2.) i referentnom etalonu tvrdoće marke Indentec (Slika 8.3.) u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava FSB-a. Tvrdoće su metodom HV2 svakom uzorku izmjerene pet puta na različitim mjestima na površini. Iz dobivenih vrijednosti izračunata je srednja vrijednost koja predstavlja tvrdoće uzoraka.



Slika 8.2. Tvrdomjer



Slika 8.3. Referentni etalon tvrdoće

Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 8.1.

Tablica 8.1. Rezultati mjerenja tvrdoće

Uzorak	Tvrdoća, HV2
AlSi5 žica	121
AlSi5 žica žarena	33,22
AlSi5 žica -140	33,2
AlSi5 žica -300	30,48
AlSi5 žica -450	32,74

Svi uzorci osim toplinski neobrađene žice imaju približno jednake tvrdoće. Visoka tvrdoća neobrađene žice rezultat je njene strukture i zaostalih naprezanja nastalih izradom žice tj. vučenjem.

Iz rezultata mjerenja može se zaključiti da je do promjene tvrdoće, odnosno do strukturnih promjena, došlo samo pri žarenju žice radi uklanjanja zaostalih naprezanja. Struktura aluminijske žice je tijekom ostalih ispitivanja ostala nepromjenjena.

Zbog sličnosti kemijskog sastava zaključci izvučeni iz ispitivanja tvrdoće aluminijskih žica mogu se primjeniti i na aluminijske pjene.

## 9. ZAKLJUČAK

Zadatak rada bio je na dilatometru ispitati ponašanje i promjene dimenzija aluminijskih pjena tijekom zagrijavanja i hlađenja. Ispitano je osamnaest uzoraka aluminijskih pjena sastava AlSi10 na temperaturama 450, 300 i 140 °C. Radi usporedbe pjena i materijala bez poroznosti ispitana su i tri uzorka aluminijske žice AlSi5 na istim temperaturama. Uzorci aluminijske žice su radi sniženja zaostalih naprezanja nastalih izradom prvo odžareni na temperaturi 450°C. Ispitana je tvrdoća uzoraka iz različitih faza ispitivanja aluminijske žice radi utvrđivanja strukturnih promjena tijekom toplinske obrade i samog ispitivanja. Analizom rezultata dobiveni su sljedeći zaključci:

- Konačna skraćenja uzoraka aluminijskih žica nakon žarenja su relativno velika što je posljedica zaostalih naprezanja koja su nastala tehnologijom izrade (vučenjem).
  - Konačne dilatacije uzoraka aluminijske žice ispitane na 140 i 300°C su vrlo male za razliku od uzorka žice ispitane na 450°C koji pokazuje kontrakciju od 22 µm što je posljedica dodatnog žarenja na ispitnoj temperaturi.
  - Tvrdoća aluminijske žice koja nije toplinski obrađena četiri puta je veća od tvrdoća žica koje su ispitane i žarene. Razlika u tvrdoćama posljedica je zaostalih naprezanja i promjene strukture žice tijekom rekristalizacijskog žarenja.
  - .- Razlike u tvrdoći između žarenih aluminijskih žica i žica žarenih i naknadno zagrijavanih na određene temperature su beznačajne.
  - Aluminijske pjene ispitane na temperaturama 140, 300 i 450°C ne pokazuju značajne promjene dimenzija nakon završetka hlađenja.
  - Koeficijent dilatacije aluminijske žice AlSi5 neznatno je veći od koeficijenta dilatacije aluminijskih pjena AlSi10 što je posljedica male razlike u kemijskom sastavu.
  - Opći zaključak koji se može izvući je da je ponašanje aluminijskih pjena tijekom zagrijavanja i hlađenja slično ponašanju aluminijskih žica.
- Daljnja istraživanja trebala bi se usmjeriti ka ispitivanju ponašanja aluminijskih pjena drukčijeg kemijskog sastava, prvenstveno aluminijskih legura sa magnezijem radi pojave precipitacijskog očvršćivanja.



## LITERATURA

- [1] Prusac Denis "Magistarski rad Otpornost na trošenje keramičkih prevlaka na aluminijским pjenama", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2007.
- [2] Hrabrić Ivan "Završni rad Određivanje apsorpcije energije udara aluminijских pjena", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- Hrabrić Ivan "Diplomski rad Apsorpcija energije udara aluminijских pjena", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.
- [3] Krapinec Zvonimir "Diplomski rad Određivanje apsorpcije energije aluminijске pjene", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010.
- [4] Previšić Pero "Diplomski rad' Apsorpcija energije udara aluminijских pjena', Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2008.
- [5] Bobek Petar "Diplomski rad Apsorpcija energije udara aluminijских pjena", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2008.
- [6] T.Filetin, I.Kramer, G.Marić "Metalne pjene- proizvodnja, svojstva i primjena", Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2003.
- [7] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson: "Compressive and tensile behaviour of aluminium foams", Materials Science and Engineering A270 (1999.), p. 113-124
- [8] E.W. Andrews, J.-S. Huang, L.J. Gibson: " Creep behaviour of a closed-cell aluminium foam", Acta mater. Vol. 47, No. 10, p. 2927-2935, 1999.